



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# **Současné trendy optimálního řízení pohonů a energetických úložišť v elektromobilech a městské trakci**

## **Disertační práce**

Studijní program: P2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612Vo45 – Technická kybernetika

Autor práce: **Ing. Pavel Jandura**

Vedoucí práce: Ing. Josef Černožorský, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechatronics, Informatics  
and Interdisciplinary Studies ■

# Recent Trends of Optimal Control of Drives and Energy Storage Systems in Electric Vehicles and Urban Traction

## Dissertation

Study programme: P2612 – Electrotechnology and Informatics

Study branch: 2612Vo45 – Technical Cybernetics

Author: **Ing. Pavel Jandura**

Supervisor: Ing. Josef Černohorský, Ph.D.



*Bibliografická citace této práce:*

JANDURA, Pavel. *Současné trendy optimálního řízení pohonů a energetických úložišť v elektromobilech a městské trakci*. Liberec, 2015. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Ústav mechatroniky a technické informatiky. Vedoucí práce Ing. Josef Černožanský, Ph.D.

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:



## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především mé rodině, která mi vytvořila podmínky ke studiu a vlastní realizaci tohoto díla. Dále pak všem kolegům z Ústavu mechatroniky a technické informatiky a Katedry vozidel a motorů Technické univerzity v Liberci, kteří se mnou spolupracovali na řešení projektu experimentálního elektromobilu. Můj dík patří i studentům studijních programů obou fakult, se kterými jsem měl možnost na projektu spolupracovat jako vedoucí jejich závěrečných prací, či jako konzultant.

Tato práce byla podpořena z projektu SGS 21065/7821 – Progressivní mechatronické, řídicí a měřicí systémy s aplikací vyspělých simulačních metod.

## Abstrakt

Disertační práce je věnována vzájemně provázané problematice návrhu optimálně řízených trakčních pohonů elektrických vozidel a využití moderních úložišť elektrické energie v elektrické trakci.

První oblast řešení se zabývá teoretickým rozbořem a simulací vybraných koncepcí hnacích ústrojí s vysokou celkovou účinností při současném respektování dynamiky jízdy vozidla. Dále pak návrhem trakční baterie vozidla, využívající nových poznatků a technologií. Pro experimentální ověření vybraných metod byl na Technické univerzitě v Liberci realizován koncept lehkého bateriového elektromobilu. Ten je ve své druhé generaci vybaven prototypem hnacího ústrojí moderní koncepce. Jedná se o ústrojí s jednorychlostní převodovkou a dvěma odlišnými střídavými elektromotory s odděleným řízením momentu. Tento typ hnacího ústrojí charakterizuje dosažení maximální účinnosti pohonu ve všech provozních režimech s ohledem na co možná nejnižší technologickou a výrobní náročnost. Pro experimentální elektromobil byl také realizován prototyp trakční baterie s možností osazení hybridním termálním managementem.

Druhá oblast řešení popisuje metody pro optimální využití rekupeované energie u vozidel závislé trakce za pomoci úložišť elektrické energie. Diskutovaná jsou jak mobilní, tak stacionární řešení pro reálná data, získaná dlouhodobým měřením tramvajového provozu v Liberci. Práce se zaměřuje především na návrh úložiště na bázi setrvačníku pro tuto konkrétní aplikaci.

## Klíčová slova

elektromobilita, hnací ústrojí, trakční elektromotor, úložiště energie, lithiové akumulátory, superkapacitory, setrvačník, měřicí systém, tramvaj

## Abstract

Dissertation is focused on the interconnected issue of designing optimally controlled electric drives in electric vehicles and the use of modern energy storage systems in the electric traction.

The first area of solution deals with theoretical analysis and simulation of chosen concepts of powertrain with high overall efficiency while respecting the vehicle driving dynamics; consequently the design of vehicle traction battery, using new findings and technologies. At the Technical University of Liberec a concept of lightweight battery electric vehicle was realized in order to experimentally verify chosen methods. Being its second generation, the vehicle is equipped with powertrain prototype of modern conception. The device itself consists of a single-speed transmission and two separate AC electric drives with joint torque control algorithm. This type of powertrain characterizes the achievement of maximum efficiency in all operational modes with regards to minimal technological and manufacturing complexity. For experimental electric vehicle a prototype of traction battery was implemented, with the option of being enhanced by hybrid thermal management.

The second area of solution describes methods for optimal use of recuperated energy in the rail vehicles of dependent traction using energy storage systems. Mobile and stationary solutions are discussed with respect to data, obtained by a long term measurements of tram traffic in Liberec. The thesis is focused mostly on the design of the storage system based on flywheel for this particular application.

## Key words

Electric mobility, Powertrain, Electric Traction Motor, Energy Storage System, Lithium Battery, Supercapacitor, Flywheel, Measuring System, Tram

# Obsah

Seznam obrázků . . . . .	11
Seznam tabulek . . . . .	15
Seznam použitých zkratk a výrazů . . . . .	16
Seznam použitých veličin a jednotek . . . . .	17
<b>1 Úvod</b>	<b>18</b>
1.1 Cíle disertační práce . . . . .	21
1.2 Struktura disertační práce . . . . .	22
<b>2 Optimalizace hnacího ústrojí elektrického vozidla</b>	<b>23</b>
2.1 Současný stav dané problematiky . . . . .	23
2.2 Vlastnosti moderních trakčních elektromotorů . . . . .	24
2.2.1 Synchronní stroje . . . . .	26
2.2.2 Asynchronní stroje . . . . .	28
2.3 Možnosti uspořádání hnacího ústrojí . . . . .	32
2.3.1 Dynamika jízdy motorových vozidel . . . . .	39
2.3.2 Popis navrženého simulačního prostředí . . . . .	45
2.3.3 Vliv uspořádání hnacího ústrojí na dynamiku jízdy . . . . .	48
2.3.4 Vliv uspořádání hnacího ústrojí na účinnost pohonu . . . . .	51
2.3.5 Konfrontace výsledků simulace s reálnými daty . . . . .	56
2.4 Zhodnocení výsledků . . . . .	57
<b>3 Experimentální elektromobil TUL</b>	<b>58</b>
3.1 Požadavky kladené na vozidlo . . . . .	58
3.2 První generace vozidla . . . . .	58
3.2.1 Popis hnacího ústrojí . . . . .	59
3.2.2 Popis trakční baterie . . . . .	60
3.3 Druhá generace vozidla . . . . .	62
3.3.1 Změny proti první generaci . . . . .	62
3.3.2 Prototyp hnacího ústrojí Dual Motor Drive System . . . . .	63
3.3.3 Návrh trakčních elektromotorů a měničů . . . . .	63
3.3.4 Návrh jednorychlostní převodovky . . . . .	65
3.3.5 Návrh algoritmu řízení a řídicí jednotky . . . . .	68
3.3.6 Simulace vozidla s navrženým ústrojím . . . . .	69
3.3.7 Popis trakční baterie . . . . .	70
3.4 Aktuální stav řešené problematiky . . . . .	73

<b>4</b>	<b>Energetická bilance provozu městské stejnosměrné trakce</b>	<b>74</b>
4.1	Tramvajový provoz v Liberci . . . . .	74
4.1.1	Současné řešení napájení tramvajové tratě . . . . .	75
4.1.2	Současný vozový park provozovaný na trati . . . . .	76
4.1.3	Současný stav využívání rekuperované energie . . . . .	77
4.2	Simulace jízdy tramvaje pro danou trať . . . . .	77
4.2.1	Vyhodnocení výsledků simulace . . . . .	79
4.3	Měření na daném úseku trati . . . . .	80
4.3.1	Cíle měření . . . . .	80
4.3.2	Měření v tramvajovém voze . . . . .	81
4.3.3	Měření v měnírně v Dolním Hanychově . . . . .	83
4.3.4	Měření v měnírně v ulici Tatranská . . . . .	83
4.4	Energetická analýza naměřených dat . . . . .	85
4.4.1	Hodnocení dat z tramvajového vozu . . . . .	85
4.4.2	Hodnocení dat z trakčních měření . . . . .	88
4.5	Statistické údaje tramvajového provozu . . . . .	91
4.6	Zhodnocení výsledků . . . . .	92
<b>5</b>	<b>Aplikace energetických úložišť v městské tramvajové trakci</b>	<b>93</b>
5.1	Technologie energetických úložišť . . . . .	93
5.1.1	Mobilní nebo stacionární varianta . . . . .	94
5.2	Provozní režim úložiště pro místní podmínky . . . . .	95
5.2.1	Metoda omezující akcelerační špičky provozu pouze pomocí energie získané rekuperací . . . . .	95
5.2.2	Metoda udržující odběr provozu na definované hodnotě pomocí kontinuálního dobíjení úložiště . . . . .	96
5.3	Volba technologie úložiště a jeho umístění . . . . .	97
<b>6</b>	<b>Návrh energetického úložiště na bázi setrvačníku</b>	<b>98</b>
6.1	Setrvačníky . . . . .	98
6.2	Projektování setrvačné hmoty . . . . .	101
6.2.1	Výpočet geometrie setrvačné hmoty . . . . .	102
6.2.2	Rozměry a design setrvačné hmoty . . . . .	103
6.2.3	Pevnostní analýza setrvačné hmoty . . . . .	103
6.3	Projektování motor-generátoru setrvačníku . . . . .	105
6.3.1	Volba elektrického stroje . . . . .	105
6.3.2	Konzultace s výrobcem pohonů . . . . .	106
6.4	Simulace úložiště na bázi setrvačníku . . . . .	108
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>110</b>
	<b>Literatura</b>	<b>112</b>

<b>Přílohy</b>	<b>123</b>
A Naměřená data elektromotoru HCS C 40000/2 I . . . . .	123
B Elektronika experimentálního elektromobilu . . . . .	125
B.1 Balancery a sonda palubní 12V baterie . . . . .	125
B.2 Centrální řídicí jednotka elektromobilu . . . . .	126
C Přehled parametrů technologií lithiových článků . . . . .	129
D Podklady pro simulaci tramvajového vozu T3R.PLF . . . . .	130
E Bilance měsíční spotřeby provozu DPMLJ . . . . .	131

## Seznam obrázků

2.1	<i>vlevo</i> : Řez rotorem PMSM s tzv. V–geometrií PM ve dvou vertikálních vrstvách L1 a L2. Dvojice PM v L1, osazených ve tvaru písmene V, nese označení 24-1 a 24-2. Tato je pak orientována paralelně k dvojici magnetů v L2 25-1 a 25-2. <i>vpravo</i> : Řez HSM motorem vozu BMW i3. Tato topologie vychází z principu tzv. paralelního rozložení magnetů s přídatnými vzduchovými dutinami. PM, označené 24 a 25, jsou zde paralelně orientovány ve dvou vertikálních vrstvách L1 a L2. PM jsou vždy symetricky uspořádány vzhledem k ose $d$ a z obou stran ohraničeny vzduchovými dutinami 26, 27 a 28, 29, které tvoří cesty k uzavření magnetického toku. Vzduchem naplněné vybrání 32-1 až 32-3, které jsou vyraženy mezi vzduchové dutiny 26 až 29 přilehlých magnetických vrstev, dále potlačují výkyvy v hustotě magnetického toku v zubech statoru. Díky tomuto řešení jsou potlačeny ztráty v železe při provozu stroje v režimu hlubokého odbuzení, tedy zejména při vysokých rychlostech jízdy vozidla [22] . . . . .	27
2.2	<i>vlevo</i> : Řez rotorem ACIM vozu Tesla Model S s detailem průřezu a geometrického uspořádání rotorových tyčí [28]. <i>vpravo</i> : Detail chlazení rotoru. Část hřídele rotoru (103) je dutá, hřídel má otevřený konec (107) a uzavřený konec (105). Přívodní trubice chladicího média (109) je pomocí podpor (111) spojena s hřídelí (103). To znamená, že hřídel i přívodní trubice rotují společně. Chladicí médium je čerpáno z rezervoáru (809) středem trubice do místa, kde narazí na ukončení duté části hřídele. Zde je odraženo zpět a vrací se prostorem mezi chladicími trubicemi a stěnou hřídele [31]	29
2.3	Přehled hlavních součástí IPM–PMSM vozu Nissan Leaf. <i>zleva</i> : Sestava rotorových a statorových plechů, detail řezu vinutí v drážkách statoru [32]	30
2.4	Rozkres IPM–PMSM vozu Chevrolet Spark EV. Tento pětipólový motor, disponující točivým momentem až 540 Nm, využívá pro vinutí statoru Cu profilů [33] . . . . .	30
2.5	Vzduchem chlazený rotor SepExSM stroje vozu Renault Zoe [34][35] .	30
2.6	Mapy účinnosti jednotek motor+měníč v motorickém režimu, určených pro pohon BEV kategorie M1 s požadavkem na vysokou dynamiku. <i>shora</i> : ACIM Siemens, typ 1PV5135-4WS28; <i>uprostřed</i> : IPM-PMSM UQM Technologies, typ PP125; <i>dole</i> : IWM-PMSM ProteanElectric, typ PD18 [Převzato z katalogových listů výrobců] . . . . .	31
2.7	Přehled hlavních koncepcí uspořádání hnacích ústrojí pro EV . . . .	32
2.8	Rozkres hnacího ústrojí vozu 0CZ vozu Volkswagen e-UP! [36] . . . .	33

2.9	Rozkres hnacího ústrojí 1ET35 vozu Chevrolet Spark EV [37] . . . . .	33
2.10	Hnací ústrojí vozu Audi R8 e-tron [38] . . . . .	34
2.11	Hnací ústrojí Michelin Active Wheel [40] . . . . .	34
2.12	Hnací ústrojí Protean Electric ProteanDrive™ [46] . . . . .	35
2.13	Schéma možného přenosu točivého momentu na kola u DCT. <i>vlevo</i> : Při zařazeném prvním převodovém stupni. <i>vpravo</i> : Zařazeném druhém stupni [52]	37
2.14	Schéma prototypu čtyřrychlostního 4SED. Každý motor je pevně spojen se svou vstupní hřídelí (jedna hřídel nese dva sudé „EVEN“ a druhá dva liché „ODD“ převody). Možné provozní stavy jsou: 1) zařazen první a druhý stupeň, 2) první a čtvrtý stupeň, 3) druhý a třetí stupeň, 4) třetí a čtvrtý stupeň, 5) pouze první stupeň, 6) pouze druhý stupeň, 7) pouze třetí stupeň, 8) pouze čtvrtý stupeň, a 9) žádný zařazený stupeň [53] . . . . .	37
2.15	Tesla Model S s hnacím ústrojím DMDS. Vozidlo využívá hlavního zad- ního a předního asistenčního pohonu s asynchronními motory s SST. Před- ní, méně výkonný, motor disponuje plochou momentovou charakteristikou, která zajišťuje vozidlu dostatečný hnací moment i ve vysokých rychlostech [54]	38
2.16	Určení působíště reakce náprav $Z$ a geometrické polohy těžiště . . . . .	45
2.17	Grafické prostředí pro vkládání parametrů simulace . . . . .	46
2.18	Časový průběh předepsané rychlosti jízdy dle cyklu NEDC . . . . .	47
2.19	Časový průběh předepsané rychlosti jízdy dle cyklu FTP 75 . . . . .	47
2.20	Parametry simulace virtuálního vozidla . . . . .	48
2.21	Mapa účinnosti převodovky řady 31–03 společnosti BorgWagner. SST této řady o hmotnosti 28 kg jsou konstruovány na vstupní točivý moment až 300 Nm a disponují účinností >96 % ve většině pracovního rozsahu [60] . . . . .	49
2.22	Grafický výstup simulace dynamiky jízdy virtuálního vozidla . . . . .	49
2.23	Mapa účinnosti virtuální jednotky PMSM–30 v motorickém režimu . . . . .	51
2.24	Ztráty při volném protáčení stroje. <i>vlevo</i> : Dvoupólový průmyslový ACIM Siemens, řady 1LA7 s osovou výškou 132 mm s demontovaným ventilátorem. Max. otáčky tohoto stroje jsou $6000 \text{ ot. min}^{-1}$ , dále je trend aproximován. <i>vpravo</i> : AF–PMSM stroj Emrax 228 [62] . . . . .	52
2.25	Simulace ústrojí: PP125 + SST ( $i_c = 7$ ) dle NEDC . . . . .	53
2.26	Simulace ústrojí: PP125 + SST ( $i_c = 7$ ) dle FTP 75 . . . . .	53
2.27	Simulace ústrojí: 1PV5135–4WS28 + SST ( $i_c = 7$ ) dle NEDC . . . . .	53
2.28	Simulace ústrojí: 2×PD18 IWM (bez převodů) dle NEDC . . . . .	54
2.29	Simulace ústrojí: PP125 + DCT ( $i_1 = 7, i_2 = 3$ ) dle NEDC . . . . .	54
2.30	Simulace DMDS: PMSM–30 @ 1PV5135 ( $i_c = 7$ ) dle NEDC . . . . .	54
2.31	Mapy účinnosti hnacího ústrojí zatížené dle NEDC. <i>legenda</i> : Čer- vená značí část ECE15, modrá EUDC. Křížky značí zatížení při konst. rychlosti, spojitě čáry zatížení při akceleraci. <i>vlevo nahoře</i> : 1PV5135+SST ( $i_c = 7$ ) <i>vlevo dole</i> : PP125+SST ( $i_c = 7$ ), zároveň odpovídá prvnímu stupni DCT. <i>vpravo nahoře</i> : 2×PD18 IWM (bez převodů) <i>vpra- vo dole</i> : PP125+DCT ( $i_c = 3$ ), odpovídá zařazenému druhému stupni DCT . . . . .	55
2.32	Mapy účinnosti hnacího ústrojí DMDS se společnou SST ( $i_c = 7$ ) dle NEDC. <i>vlevo</i> : PMSM–30 <i>vpravo</i> : 1PV5135, barevná oblast odpovídá ome- zením dynamiky jízdy deklarovaných na str. 49 . . . . .	55



3.1	Počítačový model rámu experimentálního elektromobilu TUL . . . . .	59
3.2	Funkční vzorek elektromobilu TUL, představený na MSV Brno 2013 . . . . .	62
3.3	<i>vlevo:</i> AF-PMSM stroj ME1302 [64] <i>vpravo:</i> ACIM stroj AC-20 [65] . . . . .	63
3.4	Komponenty navržené SST. <i>vlevo:</i> Díly MQ200 02T, přírubové hřídele zde nejsou vyobrazeny. <i>vpravo:</i> Nové uspořádání hnacího hřídele. Na obou stranách hřídele jsou navrženy spoje těsnými pery pro připojení elektromotorů pomocí pevných spojek . . . . .	65
3.5	Návrh vnitřního uspořádání soukolí DMDS převodovky . . . . .	66
3.6	Řez konstrukcí DMDS převodovky . . . . .	66
3.7	Návrh připojení motorů k SST. <i>vlevo:</i> Elektromotor s přírubou a navržená spojka <i>vpravo:</i> Kompletní sestava DMDS s dvojicí motorů ME1302 . . . . .	67
3.8	Mechanismus parkovací západky. Západku tvoří výpalek z materiálu 11 523. Ostatní díly jsou převzaty z převodovky řady DQ koncernu VW . . . . .	67
3.9	Schéma zapojení CAN ve voze Gen2 . . . . .	68
3.10	Parametry simulace vozidla Gen2 s ústrojím DMDS . . . . .	69
3.11	Grafický výstup simulace vozidla Gen2 s ústrojím DMDS . . . . .	69
3.12	Přehled specifické hustoty energie v závislosti na formátu článku . . . . .	70
3.13	Funkční vzorek trakční baterie vozu Gen2 . . . . .	71
3.14	Počítačový model rozloženého modulu trakční baterie Gen2. Ve funkčním vzorku baterie jsou použity 3s4p moduly s $U_n = 12\text{ V}$ bez PCM a kovových roznašečů tepla. V modelu nejsou zakresleny termistory, snímající zvlášť teplotu každé čtveřice paralelně zapojených článků . . . . .	72
3.15	Počítačový model uložení trakční baterie v podvozkovém rámu vozu Gen2. Na dně bateriové krabice jsou patrné kovové výměníky tepla, kterými proudí chladicí médium, jenž může být sdíleno s klimatizací vozu. V aktuální verzi baterie výměník a jeho komponenty nejsou osazeny. Aby je bylo možno osadit, lze použít pouze 10 modulů . . . . .	72
3.16	Elektromobil Gen2 představený na MSV Brno 2015 . . . . .	73
4.1	Grafické zobrazení výškového profilu tratě linky č.3 . . . . .	74
4.2	Modernizovaný vůz T3R.PLF v barvách DPMLJ na konečné stanici Lidové sady v Liberci. Tento typ vozu, vybavený trakční výzbrojí Cegelec, typ TV Progress, byl využíván pro měření v rámci projektu . . . . .	76
4.3	Simulace tramvajového vozu T3R.PLF pro danou trať . . . . .	79
4.4	Instalace měřicí techniky ve voze T3R.PLF. <i>vlevo:</i> Umístění měřicích sond v rozvaděčové skříni. <i>vpravo:</i> Umístění notebooku a měřicí karty . . . . .	81
4.5	Umístění analyzátoru SMC 144 a měřicích sond v rozvaděčové skříni . . . . .	82
4.6	<i>vlevo:</i> Záznam ze zimního období. <i>vpravo:</i> Záznam z letního období . . . . .	82
4.7	<i>vlevo:</i> Proudové úseky $I_{s22-26}$ . <i>vpravo:</i> Výstup z usměrňovače . . . . .	83
4.8	Základní princip měřicího systému . . . . .	84
4.9	Měřicí systém v měničárně v ulici Tatranská. <i>vlevo:</i> Realizace převodníkové skříně a její umístění v rozvodně. <i>vpravo:</i> Uživatelské prostředí pro sběr naměřených dat situované v řídicí místnosti. . . . .	84
4.10	Výkonová bilance vozu na trati s vytápěním salónu 13,5 kW . . . . .	85
4.11	Energetická bilance vozu na trati s vytápěním salónu 13,5 kW . . . . .	86

4.12	Trend spotřeby energie vozu s vytápěním salónu 13,5 kW . . . . .	86
4.13	Bilance výkonů a histogramy spotřeby energie pro linky č.2 a č.3 . . .	87
4.14	Simulace provozu na trati s virtuálně propojenými napájecími úseky .	87
4.15	Data získaná z měřírny v Dolním Hanychově . . . . .	89
4.16	Data z měřírny v ulici Tatranská. <i>vlevo</i> : Průběhy $U$ (tmavě modrá), $I_{celk}$ (růžová), $P$ (světle modrá) ze všedního dne 29.10.2014, <i>vpravo</i> : Prů- běhy $U$ , $I_{celk}$ , $P$ z víkendového provozu . . . . .	90
5.1	Okamžitý průběh výkonu odebíraného trakční měřírnu ze sítě . . .	95
5.2	Okamžitý výkon ESS při kompenzaci na 140 kW . . . . .	96
5.3	Zobrazení průběhu aktuálního množství energie uložené v ESS . . . .	96
5.4	Okamžitý průběh výkonu odebíraného trakční měřírnu ze sítě . . .	96
5.5	Okamžitý výkon ESS při kompenzaci na 43 kW . . . . .	97
5.6	Zobrazení průběhu aktuálního množství energie uložené v ESS . . . .	97
6.1	Řez nízkootáčkovým FESS společnosti Piller Group GmbH [77] . . .	100
6.2	Schéma napojení FESS k dané technologii, resp. rozvodné síti [78] . .	100
6.3	Řez diskem setrvačníku s rovnoměrným napětím s obrubou [81] . . .	101
6.4	Řez diskem setrvačníku dle definovaných kritérií . . . . .	103
6.5	ANSYS model – porovnání napětí (von Mises) . . . . .	104
6.6	ANSYS model – posunutí . . . . .	104
6.7	Typický průběh závislosti účinnosti ACIM stroje na zatížení [79] . . .	107
6.8	Momentová charakteristika ACIM Siemens 1LL8407-2PD . . . . .	109
6.9	MATLAB Simulink model – implementace modelu energetického úlo- žiště do systému tramvajové trakce. Na obrázku je jako úložiště znázor- něn model SCESS, který lze s výhodou využít i pro simulaci FESS. V ak- tuální verzi simulace není funkční blok Traction substation implementován .	109
A.1	Oteplovací charakteristika stroje HCS C 40000/2 I . . . . .	123
A.2	Pasivní odpory stroje HCS C 40000/2 I . . . . .	123
A.3	Momentová charakteristika stroje HCS C 40000/2 I . . . . .	123
A.4	Detail montáže HCS C 40000/2 Industry k dynamometru VUES . . .	124
A.5	Měřicí pracoviště dynamometru VUES ASD 6,3K-4 . . . . .	124
B.1	Balancer Gen1 pro články WB-LYP200AHA(Tall) . . . . .	125
B.2	Měřicí sonda napětí a proudu 12V palubní baterie . . . . .	125
B.3	Modul Arduino DUE s řídicím mikrokontrolérem . . . . .	126
B.4	Grafický zobrazovač VCU s podsvícenými tlačítky . . . . .	126
B.5	Budiče CAN sběrnic, čtečka MicroSD a výstup USB 2.0 z MCU . . .	127
B.6	Ovládání výkonových relé, nabíječe POW48V30A a EVSE . . . . .	127
B.7	Zapojení vstupů a výstupů jednotky VCU . . . . .	128
C.1	Přehled parametrů moderních článků Li-Ion a Li-S . . . . .	129
C.2	Přehled parametrů trakčních baterií moderních BEV . . . . .	129
D.1	Redukovaný profil stoupání tratě linky č.3 . . . . .	130
D.2	Momentová charakteristika ČKD TE022H s TV Cegelec Progress. Data jsou převzata z katalogého listu stroje a upravena dle katalogových parametrů trakční výzbroje Progress . . . . .	130

## Seznam tabulek

2.1	Přehled parametrů hnacích ústrojí moderních BEV . . . . .	24
2.2	Přehled parametrů trakčních pohonů moderních BEV . . . . .	25
2.3	Přehled vybraných trakčních pohonů pro simulaci . . . . .	48
2.4	Přehled výsledků simulace účinnosti vybraných hnacích ústrojí . . . .	52
2.5	Simulace vlivu vybraných hnacích ústrojí na spotřebu dle NEDC . . .	56
2.6	Simulace spotřeby vozidla s vybraným hnacím ústrojí dle NEDC . . .	56
3.1	Katalogové parametry elektromotoru HCS C 40000/2 I . . . . .	60
3.2	Katalogové parametry elektromotorů prototypu DMDS . . . . .	64
3.3	Katalogové parametry měničů prototypu DMDS . . . . .	64
3.4	Parametry prototypu DMDS . . . . .	69
4.1	Vybrané parametry tratě . . . . .	75
4.2	Požadavky kladené na ESS . . . . .	92
5.1	Přehled vybraných technologií ESS . . . . .	93
6.1	Požadavky kladené na FESS . . . . .	101
6.2	Katalogové parametry ACIM Siemens 1LL8407-2PD . . . . .	108
D.1	Parametry hnacího ústrojí vozu T3R.PLF . . . . .	130

## Seznam použitých zkratk a výrazů

ACIM	AC Induction Motor; asynchronní motor s kotvou na krátko
BEV	Battery Electric Vehicle; elektromobil poháněný výlučně bateriemi
BESS	Battery ESS; bateriový systém ukládání energie
BLDC	Brushless Direct Current motor; bezkartáčový DC elektromotor
BMS	Battery Management System; management trakční baterie
CAN	Controller Area Network; komunikační sběrnice
CVT	Continuous Variable Drive; variátorová převodovka
DCT	Dual Clutch Transmission; dvouspojkové převodové ústrojí
DMDS	Dual Motor Drive System; hnací ústrojí se dvěma motory
DoD	Depth of Discharge; výraz popisující hloubku vybití článku
EUDC	Extra-Urban Driving Cycle; evropský mimoměstský jízdní cyklus
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment; nabíjecí rozhraní elektromobilů
ESS	Energy Storage System; systém pro ukládání energie
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle; elektromobil poháněný palivovým článkem
FESS	Flywheel ESS; setrvačnickový systém ukládání energie
FTP 75	Federal Test Procedure; standardizovaný jízdní cyklus USA
HEV	Hybrid Electric Vehicle; vozidlo s více druhy pohonu
HSM	Hybrid Synchronous Machine; hybridní synchronní stroj
IPM	Interior Permanent magnet; rotor stroje s pohřbeným magnety
IWM	In-Wheel Motor; motor uložený přímo v kole vozidla
LCD	Liquid Crystal Display; zobrazovací jednotka s tekutými krystaly
Li-Ion	Lithium-Ion technology; lithium-iontová technologie elchem. článků
Li-S	Lithium-Sulphur technology; lithium-síra technologie elchem. článků
LFP	Lithium Iron Phosphate; aktivní materiál katody Li-Ion článku
LMO	Lithium Manganese Oxide; aktivní materiál katody Li-Ion článku
LTO	Lithium Titanium Oxide; aktivní materiál anody Li-Ion článku
MST	Multi-Speed Transmission; vícerychlostní převodovka
NCA	Nickel Cobalt Aluminium; aktivní materiál katody Li-Ion článku
NEDC	New European Driving Cycle; standardizovaný evropský jízdní cyklus
NMC	Nickel Manganese Cobalt; aktivní materiál katody Li-Ion článku
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Machine; synchronní stroj s PM
PWM	Pulse Width Modulation; pulzně šířková modulace
SCES	Supercapacitor ESS; superkapacitorový systém ukládání energie
SED	Seamless Electric Drive; hnací ústrojí s plynulým přenosem momentu
SepExSM	Separate Excited Synchronous Machine; synchronní cize buzený motor
SoC	State of Charge; výraz popisující stupeň nabití článku
SST	Single-Speed Transmission; jednorychlostní převodovka
UDC	Urban Driving Cycle (ECE 15); evropský městský jízdní cyklus
VCU	Vehicle Control Unit; řídicí jednotka vozidla
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures; celosvětově unifikovaný soubor jízdních cyklů
xWD	A-all, R-rear, F-front Wheel Drive; pohon přední, zadní a obou náprav

## Seznam použitých veličin a jednotek

symbol	jednotka	popis veličiny
$a$	$\text{m s}^{-2}$	okamžité zrychlení vozidla
$C_x$	—	koeficient aerodynamického odporu vozidla
$F_k$	N	ekvivalentní tažná síla na kolech vozidla
$f$	—	součinitel valivého odporu
$g$	$\text{m s}^{-2}$	gravitační zrychlení
$G$	N	tíha vozidla
$h$	m	geometrická výška těžiště vozidla
$H_z$	N	obvodová síla působící na kolech vozidla
$nC$	A	$n$ je jmenovitý proud, který vybije danou baterii za 1 h
$i$	—	převodový poměr
$J_m$	$\text{kg m}^2$	hmotnostní moment setrvačnosti motoru
$J_p$	$\text{kg m}^2$	hmotnostní moment setrvačnosti převodového ústrojí
$k_m$	$\text{Nm A}^{-1}$	momentová konstanta točivého stroje
$l_r$	m	rozvor náprav
$l_p$	m	geometrická vzdálenost přední nápravy od těžiště
$l_z$	m	geometrická vzdálenost zadní nápravy od těžiště
$m$	kg	hmotnost
$M_m$	Nm	točivý moment na hřídeli motoru
$M_y$	Nm	moment působící podél svislé osy vozidla
$n_m$	$\text{ot. min}^{-1}$	otáčky na hřídeli motoru
$O_a$	N	odporová síla způsobená zrychlením vozidla
$O_f$	N	odporová síla způsobená suchým a valivým třením
$O_s$	N	odporová síla způsobená náklonem trati
$O_v$	N	odporová síla způsobená odporem vzduchu
$O_r$	N	odporová síla způsobená jízdou v oblouku
$O_{v_{tunnel}}$	N	odporová síla způsobená jízdou v tunelu
$O_{t_{red}}$	N	redukovaný traťový odpor
$P_m$	W	výkon na hřídeli motoru
$r_d$	m	dynamický poloměr kola
$s$	%	stoupání trati/vozovky
$S_x$	$\text{m}^2$	čelní plocha vozidla
$t$	s	čas
$v$	$\text{m s}^{-1}$	okamžitá rychlost vozidla
$W$	Wh	energie uložená v akumulátoru
$Z_k$	N	radiální reakce nápravy
$\alpha$	°	sklon trati/vozovky
$\eta$	—	mechanická účinnost
$\mu_v$	—	součinitel rotačních částí vozidla
$\rho_v$	$\text{kg m}^{-3}$	měrná hmotnost vzduchu

# 1 Úvod

V podstatě již od prvního návrhu profesora Sibranda Acker Stratingha (Holandsko), z roku 1835, použít elektrický motor pro pohon vozidla, se o elektropohonu mluví jako o pohonu budoucnosti. A to jak pro elektrickou trakci neoddělitelně svázanou s trolejovým vedením, tak pro oblast osobní a nákladní přepravy realizované silničními vozidly. Na počátku dvacátého století byl olověnými bateriemi poháněný elektromobil ve světě již poměrně hojně rozšířen. Nicméně je třeba dodat, že vozidla se spalovacím motorem se v této době stále ještě potýkala s neuspokojivým uživatelským komfortem v podobě problémového řazení a především fyzicky náročného a nebezpečného startování motoru pomocí kliky. Uspokojivá technická řešení těchto problémů na sebe sice nenechala dlouho čekat a automobil se spalovacím motorem se stal dostatečně spolehlivým a jednoduše ovladatelným dopravním prostředkem, přesto mnohá principiální omezení přetrvala dodnes. Proti elektrickému pohonu ale pohon spalovacím motorem vždy nabízel jednu zásadní výhodu v podobě téměř neomezeného dojezdu díky vysoké specifické hustotě energie uložené ve fosilních palivech. Vozidlo se spalovacím motorem tak urazí na jednu náplň nádrže řádově stovky kilometrů, přičemž proces opětovného doplnění palivové nádrže nevyžaduje zvláště technicky náročnou infrastrukturu a trvá jen několik málo minut. Tomuto stavu se vozy nezávislé trakce s čistě elektrickým pohonem nedokázaly až do konce dvacátého století dostatečně přiblížit.

Hlavní výhodou elektromotoru vůči spalovacím motorům v trakčních aplikacích je průběh momentové charakteristiky. Elektrické motory obecně dosahují ve srovnání s výkonově ekvivalentním spalovacím motorem vyššího točivého momentu, který je k dispozici již od nulových otáček. Další výhodou trakčních elektromotorů, je možnost je krátkodobě<sup>1</sup> přetížít a takto získaný točivý moment využívat při akceleraci vozidla. Zmíněné aspekty pak umožňují realizaci vozidel, jejichž hnací ústrojí obsahuje pouze jeden stálý mechanický převod nebo i zcela bezpřevodové ústrojí. I přesto vozidlo s takovým typem hnacího ústrojí disponuje zajímavou dynamikou jízdy v běžném silničním nebo železničním provozu. S tím je úzce spjata i celková kompaktnost hnací soustavy a její vysoká spolehlivost. Nepochybnou uživatelskou výhodou je i komfort při ovládání vozidla, kdy řidič za jízdy obsluhuje pouze dva pedály (akcelerator a provozní mechanickou brzdu). Díky silnému účinku rekuperačního brzdění, lze rychlost jízdy vozidla často ovládat pouze pedálem akceleratoru.

---

<sup>1</sup> Trakční elektromotory jsou obvykle dimenzovány na 2 až 3násobné přetížení po dobu až dvou minut. U osobních elektromobilů se v technických údajích udává pouze tento krátkodobý výkon.

Neustávající pokrok ve vývoji mikrokontrolérů a výkonových polovodičových spínačů, umožňuje realizovat výkonné elektronické regulátory otáček motorů s velmi vysokou účinností a pokročilými algoritmy pro řízení libovolného principu točivého stroje. Moderní osobní elektromobily kategorie M1<sup>2</sup> pracují obvykle s jmenovitým napětím baterie v rozsahu 340–380 V a maximálním nabíjecím napětím cca 400 V. V této oblasti dnes stále dominuje technologie spínačů IGBT. I když v poslední době, zejména u vozidel závislé trakce, lze sledovat počínající konfrontaci s technologií SiC MOSFET [1][2]. Ta díky mnohem nižším spínacím ztrátám umožňuje mimo jiné snadnější migraci spínací frekvence měniče vysoko nad 20 kHz, zejména pro splnění zpřísňujících se akustických požadavků na trakční výzbroj u vozidel hromadné dopravy. U vozidel osobní městské mobility<sup>3</sup> je obvykle nasazen pohon s maximálním napětí baterie do 60 V. Právě tato hodnota dle normy IEC 60364-4-41 tvoří hranici bezpečného malého napětí a ve vozidle pak není třeba realizovat dodatečná technická opatření pro zvýšení ochrany před úrazem elektrickým proudem.

Elektrická trakce tak díky rozvoji polovodičových měničů přechází téměř výlučně na střídavé pohony. Výhody, které nabízejí, jsou nesporné. Jsou to téměř bezúdržbové stroje, a při využití moderních algoritmů řízení dosahují špičkových parametrů, jak v oblasti účinnosti, tak především dynamiky. Střídavý motor spolu s jednorychlostní převodovkou dnes představuje nejrozšířenější typ hnacího ústrojí u moderní produkce silničních i kolejových vozidel. Jedná se o univerzální řešení, které nedisponuje zásadními nedostatky. Na druhou stranu však s tímto typem hnacího ústrojí obvykle nelze zkombinovat špičkovou dynamiku jízdy vozidla při zachování vysoké účinnosti pohonu v celém rozsahu provozních rychlostí a zatížení. Tato vlastnost je dnes vyžadována zejména u vozidel nezávislé trakce, která disponují omezenou kapacitou úložiště elektrické energie. V tomto případě se nabízí posouzení přínosu speciálního hnacího ústrojí, které disponuje v tomto ohledu lepšími parametry, ovšem za cenu vyšší technologické náročnosti. Jedná se o ústrojí s více převody, motory nebo jejich kombinaci s plně automatizovanou činností.

Nejvíce problematickou součástí čistě elektrických vozidel nezávislé trakce tak dodnes zůstává systém uložení elektrické energie. V poslední době je hlavní směr vývoje orientován na dva perspektivní principy jeho realizace. Těmi jsou elektrochemické akumulátorové články v kategorii vozidel BEV a pak elektrochemické palivové články v kategorii FCEV. Kategorie FCEV, preferující vodík jako palivo, vždy slibovala rychlé odstranění dvou nejpalcivějších nedostatků, a to omezeného dojezdu a rychlost dobíjení. To, že je dnes problematika provozu technologie elektrochemických palivových článků ve vozidlech již uspokojivě vyřešena, demonstruje malosériově vyráběný vůz Hyundai ix35 FCEV kategorie M1 a funkční prototyp vozu Toyota Mirai téže kategorie, který bude zařazen do malosériové produkce letos na podzim. Hlavní překážkou pro masové rozšíření FCEV pro individuální přepravu se nyní zdá být enormně vysoká cena vodíkové technologie a především v podstatě neexistující infrastruktura vysokotlakých přečerpávacích stanic. Danou problematikou se podrobně zabývají práce [3][4][5][6].

<sup>2</sup> Dle Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/46/ES jde o osobní a užitková vozidla do 3,5 t.

<sup>3</sup> Typicky se jedná o dvoustopá vozidla a lehká vozidla kategorie L7e



Tato práce se palivovými články nezabývá. Důvodem jsou vlastnosti této technologie, které jsou, zejména pro provoz závislé trakce omezující. Moderní palivové články sice disponují dostatečným výkonem pro danou aplikaci, nicméně při skokové změně zatížení a při samotném startu stále vykazují signifikantní prodlevu v dodávce výkonu [7]. Problematický je i vysoký vnitřní odpor samotných článků a potřeba intenzivního chlazení pro udržení optimální provozní teploty [8][9]. Aby u vozidel nebyl narušen dojem z dynamiky jízdy, je pro vykrytí přechodových stavů využít přídatný zdroj elektrické energie. Kupř. u vozu ix35 FCEV slouží k tomuto účelu Li-Ion akumulátor 0,95 kWh o maximálním výkonu 24 kW [10]. Sekundární funkcí tohoto akumulátoru je pak také zužitkování rekuperované energie elektrického pohonu. Právě principiální nemožnost ukládat energii je největším omezením technologie palivových článků, zejména při porovnání s moderními elektrochemickými články.

Kategorie BEV dnes využívá téměř výhradně lithiových elektrochemických článků technologie Li-Ion. Životnost moderních bateriových systémů dnes již překračuje běžný životní cyklus vozidla nebo stacionárního úložiště energie. To dokládá dnes již standardní záruka 6–8 let / 100–160 tisíc km na trakční baterie a 10 let, s možností rozšíření až na 20 let, pro stacionární úložiště<sup>4</sup>. Označení Li-Ion zaštituje opravdu mnoho chemických struktur článků. Každou charakterizuje soubor specifických vlastností, kde bohužel minimálně jedna z nich bývá vysloveně negativní. Moderní články tak lze obecně dělit na kategorie článků s vysokou specifickou hustotou uložené energie, a kategorie článků s vysokým specifickým výkonem. Od těchto vlastností se odvíjí nasazení článků v dané aplikaci. Během prezentací experimentálního elektrického vozidla na půdě Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace jsem měl možnost vyslechnout mnoho názorů na problematiku bateriových elektromobilů. Mezi nejčastější dotazy patřila doba dobíjení baterií. V tomto ohledu je možné konstatovat, že většinu moderních průmyslových Li-Ion článků lze již trvale dobíjet proudem o násobku 1C bez významného vlivu na jejich životnost. To odpovídá nabití z 0–80 % kapacity za cca 1 hod. Tuto vlastnost potvrzuje i přítomnost zásuvky pro rychlé dobíjení DC proudem téměř u všech moderních vozidel. Přítomnost rychlého dobíjení není výrobcem obvykle nijak omezována. V případě požadavku na ještě rychlejší dobíjení lze nasadit články s vysokým specifickým výkonem. Ty lze trvale dobíjet proudy 5–8C, tedy dobít 0–80 % kapacity proběhne za méně než 10 minut, opět bez významného vlivu na jejich životnost. Nevýhodou je obvykle 2–3× nižší specifická hustota uložené energie.

Moderní úložiště elektrické energie, zejména pak technologie Li-Ion, dosáhly za posledních 10 let významného pokroku ve zlepšování parametrů a trendu snižování jejich ceny. Tento pokrok dokresluje i srovnání s více či méně stagnujícími technologiemi superkapacitorů. Pro stacionární úložiště elektrické energie je dnes již v podstatě jediným omezením cena technologie. Pro mobilní úložiště je trvale nejproblematictější otázkou limitovaná specifická hustota energie těchto technologií. Právě tato omezení, jejichž úplné odstranění v blízké budoucnosti není pravděpodobné, vedou k potřebě optimálního řízení pohonů a využití energetických úložišť v elektromobilitě.

<sup>4</sup> Záruka kryje pouze totální selhání baterie. Na pozvolnou ztrátu kapacity (obvykle do 70 % jmenovité kapacity) vlivem cyklického opotřebení a věku se nevztahuje.



## 1.1 Cíle disertační práce

Tato disertační práce si klade za cíl nalézt a ověřit nová řešení návrhu a optimálního řízení moderních pohonů a úložišť elektrické energie s cílem prodloužit dojezd elektrických vozidel nezávislé trakce a maximalizovat zužitkování rekuperované energie u vozidel závislé trakce. Toho lze dosáhnout třemi základními přístupy.

**První přístup** je založen na optimalizaci celkové spotřeby vozidla pomocí snižování jízdních odporů a hmotnosti, omezením jízdní dynamiky, zvýšením celkové účinnosti hnacího ústrojí a snížením spotřeby povinných i komfortních palubních spotřebičů elektrické energie.

**Druhý přístup** spočívá v navyšování kapacity energetického úložiště. U mobilních úložišť energie platí obecně za největší překážku konečný instalační prostor pro danou kategorii kolejových a zejména pak silničních vozidel. Signifikantního navýšení kapacity mobilního úložiště tak lze dosáhnout pouze využitím elektrochemických článků s nejvyšší dostupnou specifickou objemovou hustotou energie. Omezeného, avšak stále zajímavého přínosu lze dosáhnout i vhodnou úpravou konstrukce vozidla, za účelem maximalizace instalačního objemu, vyhrazeného pro trakční baterii.

**Třetí přístup** je platný především pro provoz závislé trakce, kde lze využít stacionárních úložišť energie. Tato úložiště obvykle nejsou omezena instalačním prostorem a také jejich kapacita se omezuje na pokrytí pouze určité části z celkového množství energie získané rekuperací, která nemohla být v daném okamžiku spotřebována jiným vozem na trati. Avšak tato musí být schopna pokrýt výkonové špičky celého provozu v řádu stovek kW až jednotek MW.

První dva zmíněné přístupy tvoří základní směr výzkumu interního projektu *elektromobilita*<sup>5</sup>, řešeného na Technické univerzitě v Liberci (TUL) ve spolupráci Fakulty mechatroniky, informatiky a mezioborových studií (FMIMS) a Fakulty strojní (FS). Získané poznatky jsou směřovány pro budoucí nasazení a praktické otestování v experimentálním elektromobilu TUL. Třetí přístup pak byl důsledně zkoumán v rámci mezinárodního projektu Ziel 3|Cíl 3 ČR–SAS 100127565/PP1 – *Vývoj komponent a metod vedoucí ke zlepšení energetické účinnosti trakce z hlediska využití energetického setrvačnicku*<sup>6</sup>, jehož výstupem je posouzení možnosti implementace energetického úložiště na bázi setrvačnicku pro provoz městského okruhu tramvajové tratě v Liberci.

Disertační práce shrnuje dosažené výsledky výzkumu v uvedených oblastech.

---

<sup>5</sup> Autor této práce je hlavním řešitelem a koordinátorem projektu za FMIMS. Řeší problematiku trakčního pohonu, trakční baterie a jejího managementu, dobíjení a ostatních elektrických zařízení.

<sup>6</sup> Autor této práce byl spoluřešitelem projektu. Řešil oblast získání a zpracování dat energetické bilance provozu a následného návrhu energetického úložiště na bázi setrvačnicku.

## 1.2 Struktura disertační práce

Tato práce je členěna do sedmi kapitol.

Kapitola 1 obsahuje obecný úvod do problematiky elektromobility a technologie moderních energetických úložišť. Jsou zde nastíněny hlavní cíle řešení této práce a stručný obsah jednotlivých kapitol.

Kapitola 2 se zabývá optimálním návrhem hnacího ústrojí elektrického vozidla s ohledem na vysokou dynamiku jízdy při zachování maximální účinnosti. Jsou zde popsány perspektivní koncepce hnacích ústrojí a popsán směr vývoje moderních trakčních elektromotorů. V této kapitole jsou uvedeny fundamentální zákonitosti dynamiky jízdy motorových vozidel a možnosti její simulace. Navržené simulační prostředí pak demonstruje výsledky vlivu jednotlivých koncepcí hnacího ústrojí na dynamiku jízdy a účinnost virtuálního vozidla.

Kapitola 3 popisuje výsledky realizace projektu *elektromobilita* v podobě dvou generací experimentálního elektrického vozidla. Zejména druhá generace využívá nových přístupů k řešení trakční baterie včetně jejího managementu a uložení ve voze. Dále popisuje nově vyvinuté hnací ústrojí pro vůz druhé generace, využívající koncepcí Dual Motor Drive System.

Kapitola 4 pojednává o energetické bilanci v městské stejnosměrné trakci. Jsou zde uvedeny výsledky dlouhodobého sledování provozu na vybrané trati tramvajového provozu dopravního podniku měst Liberce a Jablonce nad Nisou. Hodnocena jsou data získaná z měření v trakčních měřících i přímo ve voze na trati. Je zde popsána implementace nového měřícího zařízení pro vybrané zařízení provozu.

Kapitola 5 je věnována aplikaci moderních energetických úložišť pro městskou tramvajovou trakci v Liberci. Dále definuje vlastnosti vybraných technologií úložišť spolu s metodami jejich implementace do reálného provozu.

Kapitola 6 popisuje návrh energetického úložiště na bázi setrvačníku. Rozebírá návrh dvou významných komponent zařízení, a to ideový návrh vlastní setrvačné hmoty a vlastnosti vhodného točivého stroje ve funkci motor–generátoru. Je zde diskutován i přístup k simulaci energetické bilance úložiště a jeho implementace do stávající technologie tramvajové trakce.

Kapitola 7 obsahuje závěrečné shrnutí dosažených výsledků a přínosy této disertační práce. Jsou zde obsaženy i náměty na budoucí výzkum v dané problematice.

## 2 Optimalizace hnacího ústrojí elektrického vozidla

### 2.1 Současný stav dané problematiky

V této kapitole jsou diskutována hnací ústrojí, koncipovaná primárně pro nasazení v osobních vozidlech kategorie BEV. Nicméně lze je analogicky použít i u trolejbusů, elektrobuses, či nákladních vozidel téže kategorie. Principiálně pak tyto koncepce s několika specifiky využívají i tramvajové vozy. Mezi tato specifika patří zejména požadavek na pohon všech náprav pro dosažení požadovaného přenosu trakčních sil na kolejnici. Druhé specifikum souvisí s požadavkem na kompletní nízkopodlažnost u moderních tramvajových souprav. Zde převládají koncepce trakčních pohonů s podélně orientovanými trakčními motory pohánějící dvojkolí s menšími koly, nebo volně otočná kola po jedné straně podvozku [11]. V případě volně otočných kol je žádané elektronicky simulovat vlnivý pohyb dvojkolí při jízdě, který jinak zajišťuje příčná vazba kol [12].

U osobních BEV lze volit z více typů uspořádání hnacího ústrojí s téměř libovolným principem točivého stroje [13][14]. Tato lze použít pro pohon přední (FWD) nebo zadní nápravy (RWD) automobilu, případně pro pohon všech čtyř kol (AWD). Společnou vlastností většiny sériově vyráběných hnacích ústrojí pro BEV je využití možnosti pevného spojení motoru s převodovkou. Vlastní přítomnost spojky není pro činnost elektrického pohonu podstatná, a díky tomu, lze hnací ústrojí značně zjednodušit a především zmenšit. Nicméně absence možnosti odpojit motor od kol sebou následně přináší i některé nevýhody. Například v současné době nejčastěji nasazovaný typ synchronního stroje s permanentními magnety (PMSM) v různých modifikacích [15] při volném protáčení generuje elektromotorické napětí (BEMF), které působí ztráty v magnetickém obvodu, trvale nabuzeného točivého stroje, během „plachtění“ vozidla. S tímto jevem souvisí také problematika tažení vozidla s bezspojkovým hnacím ústrojím s PMSM, kde výrobci často dovolují pouze pomalé odtlačení vozidla do rychlosti  $5 \text{ km h}^{-1}$  [16].

Další vlastnost, kterou je třeba při konstrukci hnacího ústrojí brát na zřetel je, že běžně používaná provedení trakčních elektromotorů mají při nečinnosti jen velmi omezený brzdný účinek. Proto je nezbytné, aby hnací ústrojí EV obsahovalo mechanismus umožňující zablokování některé své části tak, aby mohlo být vozidlo zajištěno proti pohybu při zastavení i bez použití ruční brzdy.

Volba konkrétního uspořádání hnacího ústrojí tak má zásadní vliv na očekávané požadavky, jak na dynamiku jízdy vozidla, tak i celkovou účinnost hnacího ústrojí a tím i na dojezd vozidla dle definovaného jízdního cyklu. V současné době je maximální rychlost elektromobilů obvykle elektronicky omezována a hranice bývá stanovena okolo rychlosti  $150 \text{ km h}^{-1}$  (vyjma sportovních vozů). To znamená pro dnes běžně užívané celkové převodové poměry jednorychlostních převodovek v rozsahu  $i = 8\text{--}10$  maximální otáčky elektromotoru a tedy i převodovky cca  $10\,000\text{--}12\,000 \text{ ot. min}^{-1}$  viz tabulka 2.1. Pro bezpřevodová hnací ústrojí jsou pak zapotřebí maximální otáčky pomaloběžného elektromotoru cca  $1000\text{--}1200 \text{ ot. min}^{-1}$ . Hlavním důvodem omezení max. rychlosti, bez ohledu na zvolený typ hnacího ústrojí, je stále ještě značně omezená specifická hustota energie v lithiových bateriích a tedy velmi omezený dojezd vozidla při vysokých konstantních rychlostech.

**Tabulka 2.1:** Přehled parametrů hnacích ústrojí moderních BEV

Vozidlo	Parametry hnacího ústrojí <sup>a</sup>					
	max. moment [Nm]	max. výkon [kW]	max. otáčky [ot. min <sup>-1</sup> ]	max. rychlost [km h <sup>-1</sup> ]	princip motoru [-]	přev. poměr [-]
VW e-Golf	270	85	12 000	140	PMSM	9,76
VW e-Up!	210	60	12 000	130	PMSM	8,16
BMW i3	250	125	11 400	150	HSM <sup>b</sup>	9,70
Nissan Leaf	280	80	10 400	145	PMSM	7,94
Renault Zoe	220	65	11 300	135	SepExSM	8,20
Chevrolet Spark EV	542	105	5000	145	PMSM	3,18 3,87 <sup>c</sup>
Kia Soul EV	285	81,4	10 000	145	PMSM	8,20
Tesla	600	350	16 000	225	ACIM	9,73
Model S P85D	331	165	18 000	250	ACIM	9,73 <sup>d</sup>
Audi R8 e-tron	2×460	2×170	-	200	PMSM	6,00

<sup>a</sup> Uvedené hodnoty v některých případech podléhají zaokrouhlení

<sup>b</sup> Principiálně se jedná o speciálně upravený typ PMSM

<sup>c</sup> Změna ve výrobě zavedená od modelového roku 2015

<sup>d</sup> Hodnoty v tomto řádku platí pro přední asistenční pohon vozidla

## 2.2 Vlastnosti moderních trakčních elektromotorů

Točivé stroje, používané v moderních BEV, obvykle představují vrchol současného stavu poznání vědy a techniky v této oblasti. Každý princip disponuje specifickými vlastnostmi a tudíž volba konkrétního točivého stroje není vždy jednoznačná a je vždy vhodné ji podmínit konkrétnímu typu vozidla, respektive jeho hnacímu ústrojí. Výrobci moderních BEV vyžadují stroje, kombinující velmi vysokou specifickou hustotu výkonu a trvalý provoz v širokém pásmu provozních otáček při zachování

vysoké účinnosti. Aby bylo možno těmto požadavkům vyhovět, bývá motor navržen pro práci v režimu hlubokého odbuzení. Nominální otáčky<sup>1</sup> točivého stroje tak bývají  $1/3$  až  $1/5$  maximálních provozních otáček, viz následující tabulka 2.2.

**Tabulka 2.2:** Přehled parametrů trakčních pohonů moderních BEV

Vozidlo	Parametry trakčního pohonu <sup>a</sup>					
	nom. otáčky [ot. min <sup>-1</sup> ]	nom. výkon [kW]	počet pólů [-]	hmotnost motoru [kg]	nom. napětí [V]	princip chlazení [-]
VW e-Golf	3000	50 <sup>b</sup>	4	74	374	kapalina
VW e-Up!	2750	40 <sup>c</sup>	4	61	324	kapalina
BMW i3	4800	75	6	50	360	kapalina
Nissan Leaf	3000	-	4	58	365	kapalina
Renault Zoe	2800	50	4	-	345	vzduch
Chevrolet Spark EV	2000	-	5	-	369	kapalina
Kia Soul EV	2800	-	4	-	355	kapalina
Tesla	5600	-	4	-	345	kapalina
Model S P85D	11 000	-	4	-	345	kapalina
Audi R8 e-tron	3500	-	4	-	374	kapalina

<sup>a</sup> Uvedené hodnoty v některých případech podléhají zaokrouhlení

<sup>b</sup> Ve voze je dlouhodobý výkon motoru pouze 40 kW kvůli omezení výkonem baterie

<sup>c</sup> Ve voze je dlouhodobý výkon motoru pouze 35 kW kvůli omezení výkonem baterie

Z výše uvedených tabulek vyplývá, že majorita moderních BEV kategorie M1 využívá moderní synchronní točivé stroje se sinusovým průběhem BEMF. Nicméně automobilka Tesla Motors dokazuje, že i návrh asynchronního stroje může být konkurenceschopný ve většině sledovaných parametrech. Stejnoseměrné komutátorové stroje v této kategorii vozidel již používány nejsou a v posledním desetiletí se upouští i od využívání bezkartáčového provedení BLDC zcela ve prospěch PMSM. Reluktanční stroje se sice díky značnému úsilí, věnovanému jejich vývoji v posledních letech<sup>2</sup>, značně přiblížily vlastnostem PMSM [17], avšak principiálně nikdy nemohou zcela dosáhnout všech jejich vlastností. Z tohoto důvodu jejich masovější rozšíření závisí právě na nedostatku materiálů pro výrobu PM.

Moderní tramvajové vozy a soupravy využívají již také výhradně asynchronní a synchronní točivé stroje. Poměrně často se lze stále setkat i s repasovanými sériovými stejnosměrnými motory vybavenými moderní trakční výzbrojí.

<sup>1</sup> Odpovídají pracovnímu bodu stroje, kde dochází k poklesu nominálního točivého momentu o 3 %.

<sup>2</sup> Motivací pro tento vývoj byl i dramatický nárůst cen materiálů pro výrobu permanentních magnetů na bázi neodymu, způsobený cly uvalenými ČLR na jejich vývoz v podobě nezpracovaných surovin na konci roku 2010 [18]. Po uvolnění cel se situace značně zlepšila, nicméně zejména cena dysprosia, jehož je ČLR jediným dodavatelem, se stále ještě nevrátila na úroveň před jejich zavedením.

### 2.2.1 Synchronní stroje

Synchronní stroje lze členit do tří kategorií dle principu jejich buzení, což ovlivňuje zejména konstrukci rotoru. Naopak konstrukce drážkovaného statoru je obdobná pro všechny střídavé stroje. Dodnes stále převažuje vinutí tvořené svazky izolovaného Cu drátu. Lze se ale běžně setkat i s vinutím skládaným z izolovaných Cu profilů.

- **stroje buzené permanentními magnety (PMSM)**

Největší předností tohoto typu stroje je trvalá přítomnost zdroje buzení v permanentních magnetech. Z tohoto důvodu se jedná o točivý stroj s principiálně nejvyšší prakticky dosažitelnou účinností, neboť pro jeho provoz není třeba generovat budící pole více či méně ztrátovou cestou. Výrobci těchto strojů pro EV dnes preferují téměř výlučně nejsilnější PM na bázi prvků vzácných zemin NdFeB. Většina problematických vlastností tohoto materiálu, jako křehkost či náchylnost ke korozi, byla již uspokojivě technologicky vyřešena. Jediným, o to však závažnějším nedostatkem tak zůstává Curieova teplota původního materiálu 80 °C, která jej v této podobě činí nepoužitelným pro točivé stroje. Problém je sice rovněž řešitelný dopováním materiálu NdFeB dysprosiem<sup>3</sup>, jehož hlavním přínosem je právě navýšení koercitivní síly magnetu a s tím spojené zvýšení Curieovy teploty spolu s odolností proti demagnetizaci při hlubokém odbuzení stroje. Dopování umožňuje navýšit trvalou provozní teplotu i přes 200 °C<sup>4</sup>. Nicméně právě celosvětově velmi omezená dostupnost dysprosia diktuje cenu PM na bázi NdFeB, které tak tvoří majoritní položku z výrobní ceny jinak materiálově nenáročného PMSM [19]. Tyto stroje tak dnes stále patří mezi výrobně nejdražší a většina jejich výrobců hledá cesty, jak snížit obsah dysprosia v magnetickém materiálu na nezbytné minimum [21], či jeho nahrazení jiným prvkem s lepší dostupností. Další přístup, který lze v posledních letech pozorovat, tkví ve snaze o minimalizaci množství použitého magnetického materiálu jako takového, při zachování požadovaných parametrů točivého stroje.

Většinu PMSM pro BEV dnes tvoří stroje s radiálním magnetickým tokem a rotorem s pohřbenými magnety (IPM). Tyto stroje nejlépe vyhovují požadavkům na pohon s jednorychlostní převodovkou. Optimalizace návrhu rotoru pak vede na geometrii osazení PM do tvaru písmene V, ideálně ve více vrstvách<sup>5</sup>. Právě díky rozdílné hodnotě magnetických reluktancí v  $d$  a  $q$ -ose tak lze využívat i reluktančního momentu, který je rovněž závislý na rozdílu indukčností v  $d$  a  $q$ -ose. Tato složka se pak spolu s magnetickým tokem působeným PM podílí na celkovém momentu stroje daného rovnicí (2.1). Největší přínos má tato složka právě v oblasti hlubokého odbuzení. Stroje s touto geometrií rotoru pak bývají nazývány hybridní.

$$M_d = \frac{3}{2} p_p [\psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2.1)$$

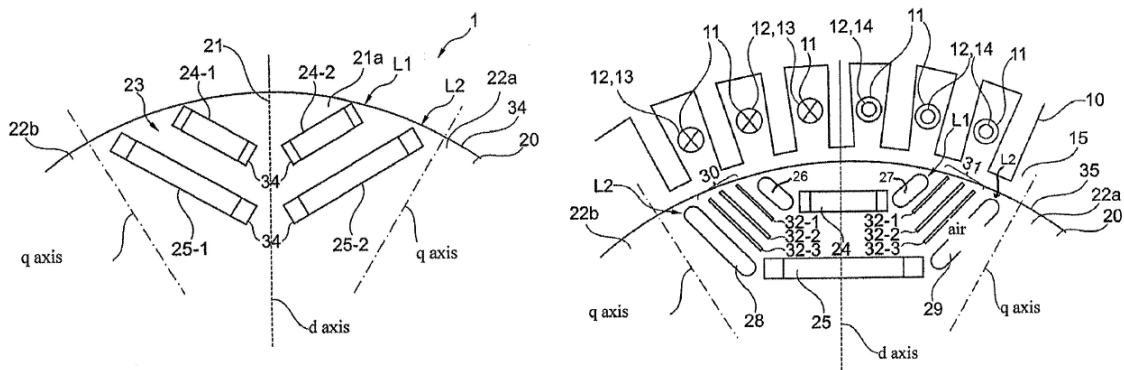
<sup>3</sup> Technologicky může jít o proces difuze prášku Dy do rovněž práškového materiálu NdFeB za přítomnosti vysoké teploty, kde atomy Dy nahrazují některé atomy Nd v krystalických částicích [20].

<sup>4</sup> Běžně se však u EV používají PM s Curieovou teplotou pouze do 150 °C, protože silné dopování dysprosiem provází negativní efekt v podobě snížení remanentní magnetické indukce  $B_r$ .

<sup>5</sup> Běžně jsou používány dvě magnetické vrstvy, aplikace více vrstev je již výrobně velmi náročná.



Touto cestou se již vydala většina automobilek produkujících BEV s PMSM. Automobilka BMW pak koncept hybridního synchronního stroje (HSM) rozpracovala do dnes patrně nejdokonalejší podoby a především jej přivedla do sériové výroby u svých modelů i3 a i8. Přednostmi HSM tak jsou kompaktnost, vysoká přetížitelnost a zejména u PMSM dříve nebývale široká oblast vysoké účinnosti. Z hlediska provozních parametrů se tak dnes jedná o nejdokonalejší točivé stroje na trhu.



**Obrázek 2.1:** *vlevo:* Řez rotorem PMSM s tzv. V-geometrií PM ve dvou vertikálních vrstvách L1 a L2. Dvojice PM v L1, osazených ve tvaru písmene V, nese označení 24-1 a 24-2. Tato je pak orientována paralelně k dvojici magnetů v L2 25-1 a 25-2. *vpravo:* Řez HSM motorem vozu BMW i3. Tato topologie vychází z principu tzv. paralelního rozložení magnetů s přidavnými vzduchovými dutinami. PM, označené 24 a 25, jsou zde paralelně orientovány ve dvou vertikálních vrstvách L1 a L2. PM jsou vždy symetricky uspořádány vzhledem k ose  $d$  a z obou stran ohraničeny vzduchovými dutinami 26, 27 a 28, 29, které tvoří cesty k uzavření magnetického toku. Vzduchem naplněné vybrání 32-1 až 32-3, které jsou vyraženy mezi vzduchové dutiny 26 až 29 přilehlých magnetických vrstev, dále potlačují výkyvy v hustotě magnetického toku v zubech statoru. Díky tomuto řešení jsou potlačeny ztráty v železe při provozu stroje v režimu hlubokého odbuzení, tedy zejména při vysokých rychlostech jízdy vozidla [22]

PMSM je zatím v podstatě jedinou perspektivní technologií, která umožňuje zkonstruovat dostatečně kompaktní stroj pro bezpřevodové hnací ústrojí, umístěné přímo v kolech vozidla (IWM). Proti ústrojí s běžně užívaným převodovým poměrem v rozsahu  $i = 8-10$ , musí takový stroj disponovat  $4-5\times$  větším kroutícím momentem pro 2WD, resp.  $2-2,5\times$  větším momentem pro 4WD pro zachování ekvivalentní jízdní dynamiky. Z fundamentální rovnice (2.1) určující moment PMSM tak vychází přímočará cesta ke konstrukci IWM v podobě mnohopólového stroje s rotačním pláštěm<sup>6</sup>, kde plášť tvoří zároveň unašeč disku kola. Technologie výroby IWM je dnes již velmi dobře zvládnuta, nicméně přes veškeré vynaložené úsilí tyto stroje stále vykazují mnohem nižší celkovou účinnost [23], zejména ve srovnání s HSM.

<sup>6</sup> V praxi je obvykle počet pólů stroje limitován maximální frekvencí měniče nezbytné pro dosažení požadovaných otáček. Běžně se tak IWM konstruují s počtem pólů v rozmezí 40–64. Pro případ náhodného selhání, bývají IWM koncipovány jako jednotka složená z minimálně 4 submotorů s vlastním měničem, kde každý je schopen samostatné činnosti.

- **stroje buzené elektromagnetem (SepExSM)**

Mezi hlavní přednosti tohoto stroje patří nezávislost na drahých materiálech, nezbytných pro výrobu PM a plynulé řízení budicího proudu. Právě možnost přímo ovlivňovat buzení, umožňuje stroji pracovat v optimálních podmínkách při všech provozních rychlostech i zatížení. Toto je zřejmé při pohledu do mapy účinnosti moderního SepExSM. Maximální účinnost zde nedosahuje hodnot přes 95 %, zcela běžných pro moderní PMSM. Ovšem během standardizovaných jízdních cyklů účinnost obvykle neklesá pod 70 %.

V současné době tento typ stroje využívá pouze automobilka Renault ve svém BEV modelu Zoe. I když je dnes již obvykle preferován bezkontaktní přenos energie do budicího vinutí, tak tento stroj používá i nadále kartáče. Zajímavostí je i u moderních BEV neobvyklé chlazení vzduchem. Vzduch je zde pod tlakem hnán nejen skrz vyražené kanálky ve statoru, ale také vybráním v pólových nástavcích rotoru. Právě nucené chlazení rotoru je u SepExSM nezbytným předpokladem pro možnost stroje opakovaně krátkodobě přetěžovat a podpořit tím dynamiku jízdy vozidla.

- **stroje s hybridním zdrojem buzení (HESM)**

V tomto kontextu se rozumí takový stroj, kde jeho celkový budicí magnetický tok vzniká synergickým působením PM a separátního budicího vinutí [24][25]. Vzhledem k požadavku na bezkartáčové provedení točivého stroje bývá obvykle budicí vinutí integrováno ve statoru. Principiálně se tak jedná o nejdokonalejší synchronní stroj, kombinující výhody PMSM a SepExSM. Praktická implementace tohoto stroje však v současné době nenabízí o tolik lepší parametry než PMSM, resp. HSM a proto žádná automobilka tento typ stroje sériově nepoužívá.

### **2.2.2 Asynchronní stroje**

Asynchronní stroje (ACIM) pravděpodobně navždy zůstanou, z pohledu dosažitelných parametrů ve vybraných technických aplikacích, inferiorní vůči PMSM. Toto tvrzení platí i pro oblast osobních BEV kategorie M1, kde se obvykle nepředpokládá instalace jediného trakčního stroje s jmenovitým výkonem vyšším než 300 kW. Právě tato hodnota výkonu v současné době začíná limitovat dosažitelné vlastnosti PMSM s NdFeB magnety<sup>7</sup>. To ostatně můžeme pozorovat na velmi omezeném nasazení PMSM jako samostatného trakčního motoru u trolejbusů, elektrobusů a zejména pak u kolejových vozidel.

Těmi největšími nedostatky kompaktních ACIM proti PMSM jsou obecně nižší celková účinnost stroje, především pak v oblasti nízkého zatížení a provozu při hlubokém odbuzení. Dále nižší opakovatelná přetížitelnost daná relativně vysokými ztrátami v rotoru a nižší specifická hustota výkonu. Přesto může vhodně zkonstruovaný ACIM představovat zajímavé řešení pro užití v kategorii M1, pokud je při jeho návrhu respektováno několik podmínek.

---

<sup>7</sup> Problematická je i cena magnetického materiálu, potřebného pro jejich realizaci.



- **Měděný rotor**, přesněji řečeno použití Cu jako materiálu klecového vinutí na krátko, namísto tradičního hliníku, je tím nejdůležitějším principem pro navýšení specifické hustoty výkonu stroje a zároveň i zlepšení jeho celkové účinnosti [26]. Technologie přesného lití Cu je sice výrobně náročnější oproti lití Al, už jen téměř dvojnásobnou teplotou, nicméně rotor stroje i tak zůstává mnohem levnější než u PMSM. Značný vliv na výsledné parametry stroje má i zvolený osový průřez a geometrické uspořádání jednotlivých tyčí rotoru [27][28]. Použitím Cu dochází ke snížení rotorových ztrát stroje běžně o 50 % i více [29][30]. Díky tomu lze tento stroj také častěji krátkodobě přetěžovat než podobný stroj s Al rotorem.
- **Chlazení rotoru** je pak jediná další cesta jak podstatně navýšit krátkodobou přetížitelnost stroje a přiblížit jej, v tomto pro BEV důležitém parametru, na dosah PMSM. Chlazení rotoru také přispívá k dalšímu navýšení celkové účinnosti stroje, ovšem toto navýšení již není významné. Chlazení rotoru točivého stroje je obecně konstrukčně poměrně náročné, neboť principiálně vyžaduje dutou hřídel s kanálky pro usměrnění průtoku chladicí kapaliny a kvalitní utěsnění mechanismu. Toto řešení v současnosti využívá pouze automobilka Tesla Motors.

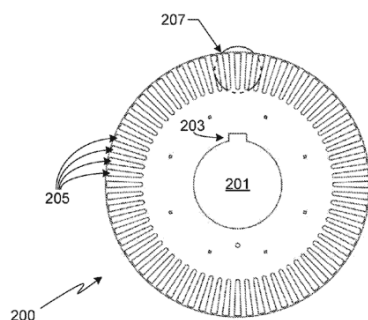


FIG. 2

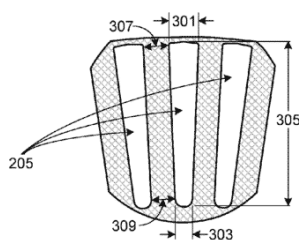


FIG. 3

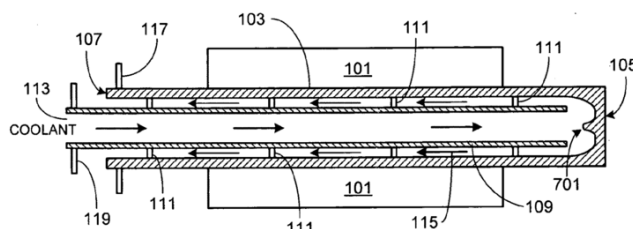


FIG. 7

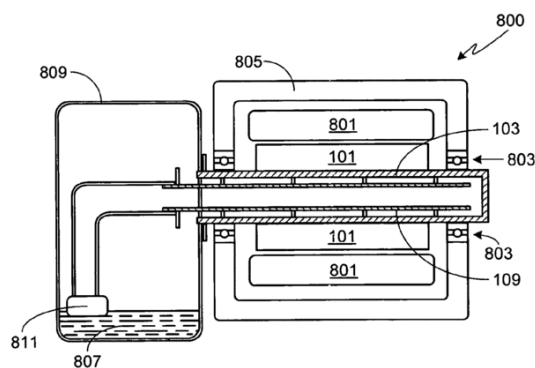
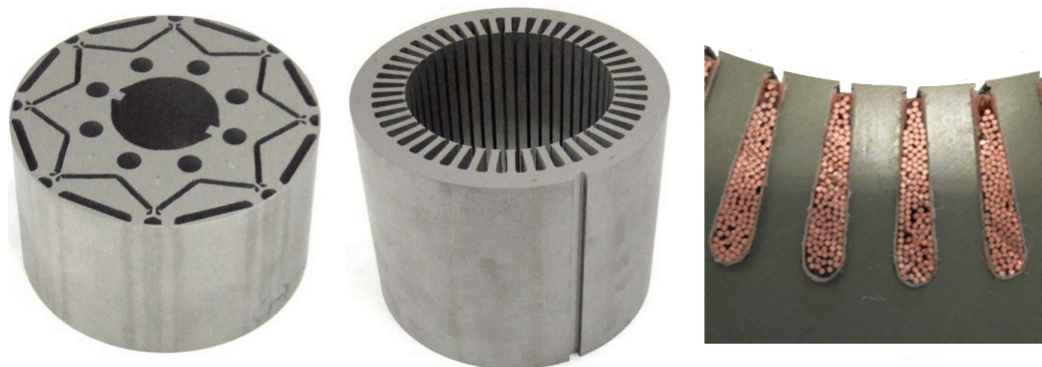
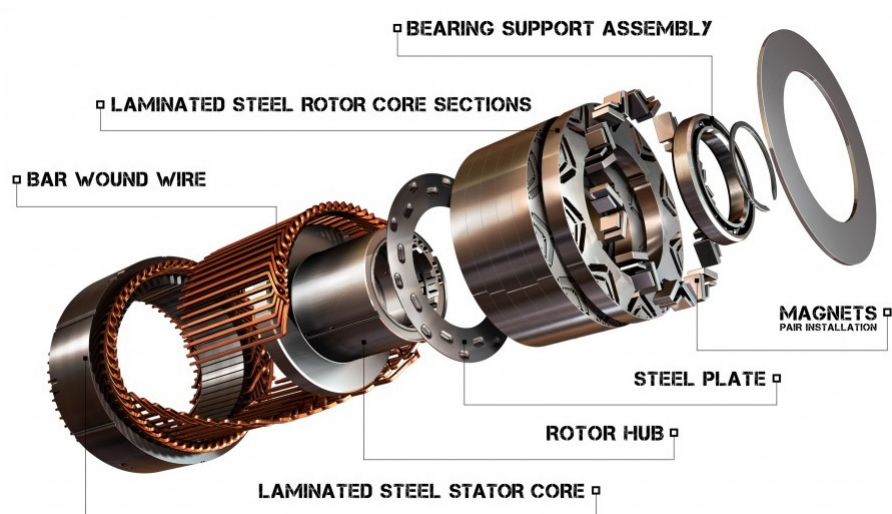


FIG. 8

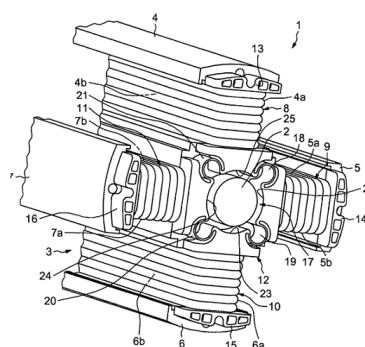
**Obrázek 2.2:** *vlevo:* Řez rotorem ACIM vozu Tesla Model S s detailem průřezu a geometrického uspořádání rotorových tyčí [28]. *vpravo:* Detail chlazení rotoru. Část hřídele rotoru (103) je dutá, hřídel má otevřený konec (107) a uzavřený konec (105). Přívodní trubice chladicího média (109) je pomocí podpor (111) spojena s hřídelí (103). To znamená, že hřídel i přívodní trubice rotují společně. Chladicí médium je čerpáno z rezervoáru (809) středem trubice do místa, kde narazí na ukončení duté části hřídele. Zde je odraženo zpět a vrací se prostorem mezi chladicí trubicí a stěnou hřídele [31]



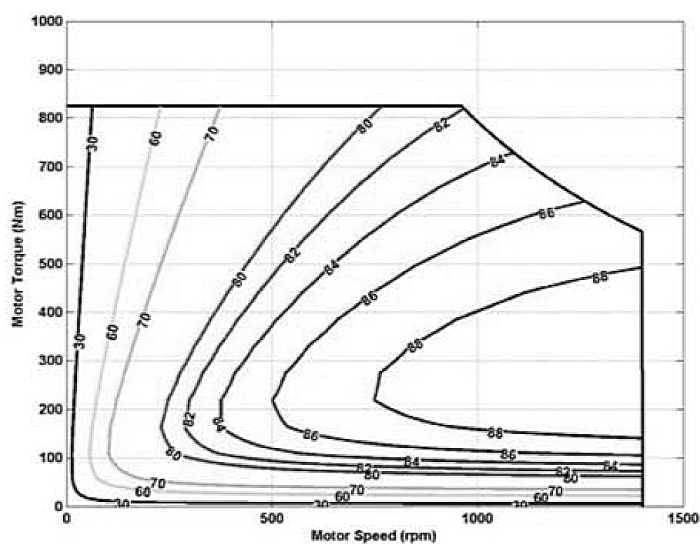
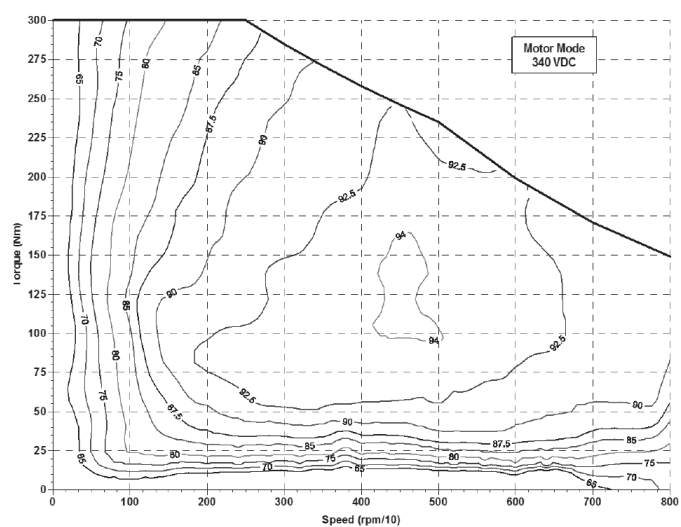
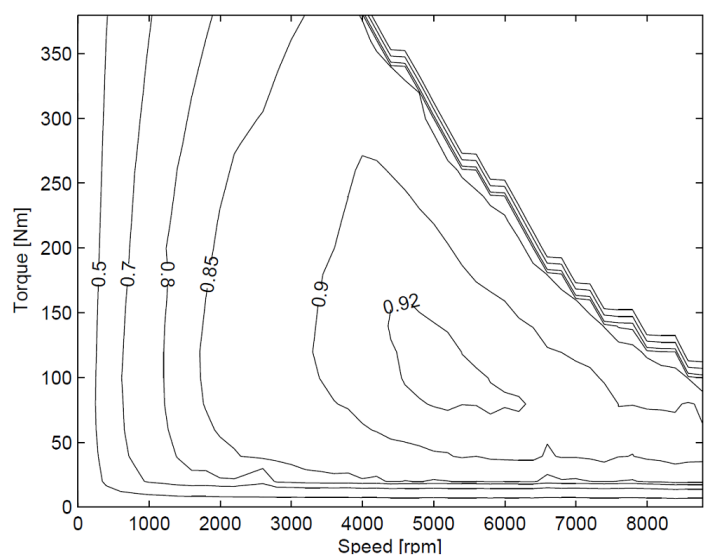
**Obrázek 2.3:** Přehled hlavních součástí IPM–PMSM vozu Nissan Leaf. *zleva:* Se-stava rotorových a statorových plechů, detail řezu vinutí v drážkách statoru [32]



**Obrázek 2.4:** Rozkres IPM–PMSM vozu Chevrolet Spark EV. Tento pětipólový motor, disponující točivým momentem až 540 Nm, využívá pro vinutí statoru Cu profilů [33]



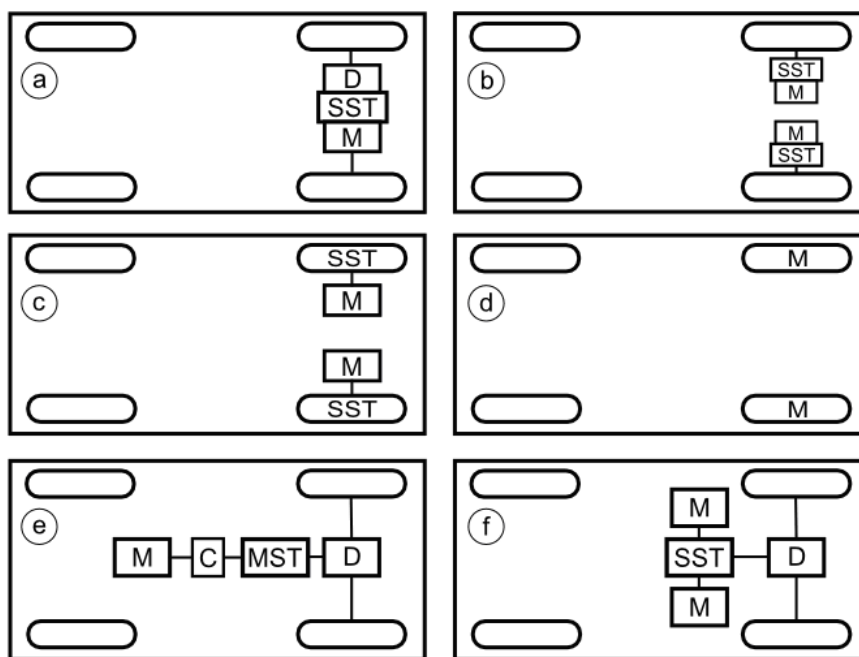
**Obrázek 2.5:** Vzduchem chlazený rotor SepExSM stroje vozu Renault Zoe [34][35]



**Obrázek 2.6:** Mapy účinnosti jednotek motor+měníč v motorickém režimu, určených pro pohon BEV kategorie M1 s požadavkem na vysokou dynamiku. *shora:* ACIM Siemens, typ 1PV5135-4WS28; *uprostřed:* IPM-PMSM UQM Technologies, typ PP125; *dole:* IWM-PMSM ProteanElectric, typ PD18 [Převzato z katalogových listů výrobců]

## 2.3 Možnosti uspořádání hnacího ústrojí

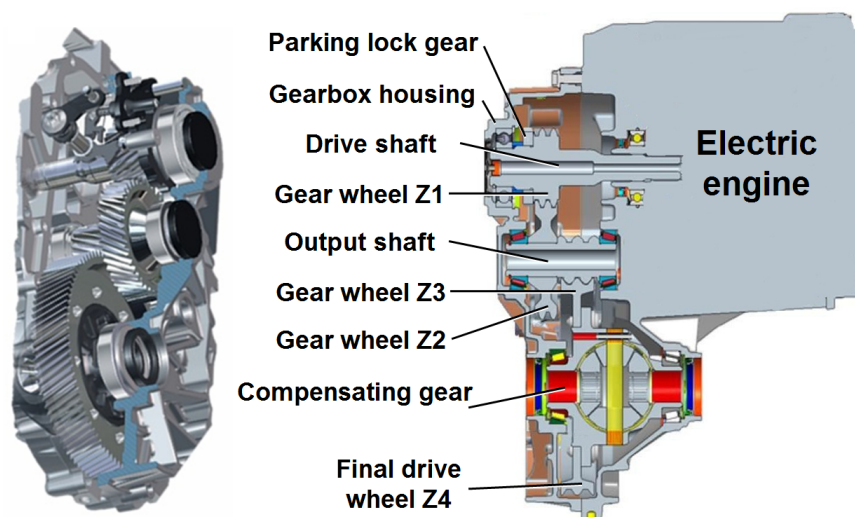
Příklady základních uspořádání hnacích ústrojí BEV<sup>8</sup> jsou uvedeny na obrázku 2.7. Pokud je vozidlo konstruováno jako zcela nový model, je výrobci obvykle preferováno uspořádání RWD, především kvůli jeho lepším trakčním charakteristikám. Nicméně někteří výrobci preferují modulární platformu svých modelů, kterou lze sdílet pro více druhů pohonů. V tom případě bývá elektrické hnací ústrojí instalováno na původním místě spalovacího motoru.



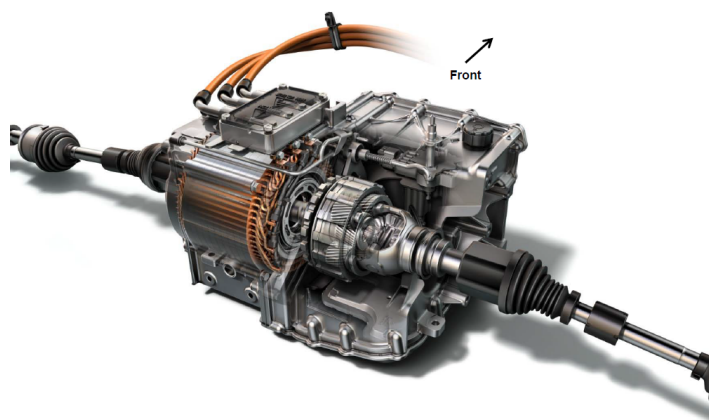
Obrázek 2.7: Přehled hlavních koncepcí uspořádání hnacích ústrojí pro EV

**Uspořádání a)** dnes využívá naprostá většina automobilek. Jedná se o univerzální řešení, které netrpí většími technickými problémy. Hnací ústrojí obvykle tvoří kompaktní celek elektromotoru a SST, který lze snadno instalovat do stávající technologie samonosných karoserií jako okamžitou náhradu za spalovací motor. Ušetřené místo bývá často obsazeno palubní AC nabíječkou, nebo může být pod kapotou vyhrazeno místo pro uložení nabíjecí kabeláže. Vlastní konstrukce převodovky je obvykle tvořena dvěma ozubenými soukolími, přičemž druhý převod tvoří soukolí rozvodovky s mechanickým diferenciálem viz obr. 2.8. Běžně se lze setkat i s použitím planetové převodovky, obr. 2.9. Moderní SST dosahují velmi vysoké účinnosti, která v celém provozním rozsahu otáček a zatížení BEV obvykle neklesá pod 96 %. Celkovou účinnost hnacího ústrojí i dynamiku jízdy vozidla tak zde ovlivňují výhradně vlastnosti použitého trakčního elektromotoru.

<sup>8</sup> M - elektromotor; SST - jednorychlostní převodovka; MST - vícerychlostní převodovka; C - spojka; D - diferenciál



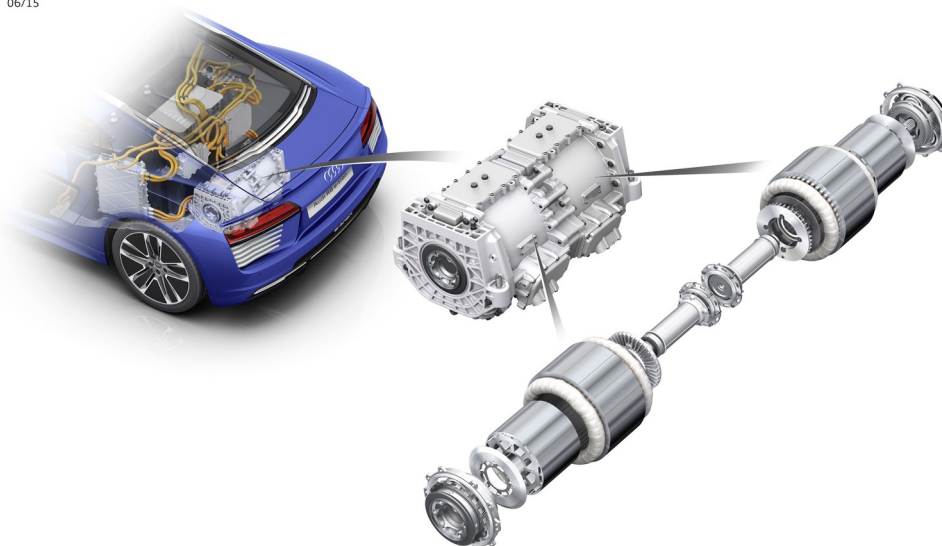
Obrázek 2.8: Rozkres hnacího ústrojí vozu 0CZ vozu Volkswagen e-UP! [36]



Obrázek 2.9: Rozkres hnacího ústrojí 1ET35 vozu Chevrolet Spark EV [37]

**Uspořádání b)** Zde jsou na nápravě použity dva nezávislé elektromotory, každý s vlastní SST. Převodovky mohou být i zde planetové nebo standardní. Celé ústrojí je obvykle provedeno jako jedna kompaktní jednotka, centrálně uložená ve voze viz obrázek 2.10. Toto řešení diferencuje otáčky kol v zatáčce elektronicky. Hlavní výhoda spočívá právě ve zlepšení jízdních vlastností vozidla při průjezdu zatáčkou, nebo v případě ztráty trakce pod jedním z kol. Vlastní akční zásah stabilizačního programu vozidla tak není odkázán pouze na možnost přibrzdění jednoho z kol, ale může i druhému kolu téměř okamžitě přidat potřebný točivý moment. Tím je dosahováno mimořádně kvalitní stabilizace. Výhoda v podobě odstranění ztrát energie oproti modernímu mechanickému diferenciálu je však v běžném provozu spíše zanedbatelná. Jako nevýhodu této koncepce lze označit úplnou nepojízdnost vozidla v případě poruchy jednoho z pohonů. Tento typ hnacího ústrojí tak nachází uplatnění zejména ve sportovních vozech, kde je vyžadována kvalitní stabilizace vozu při průjezdu zatáčkou, obvykle bez ohledu na složitost a cenu ústrojí.





Obrázek 2.10: Hnací ústrojí vozu Audi R8 e-tron [38]

**Uspořádání c)** je podobné předchozímu, ale kompletní hnací ústrojí je umístěno přímo v kolech. Pro redukci otáček a násobení momentu jsou využívány většinou malé planetové převodovky. Moderní řešení mohou obsahovat i integrované odpružení hmoty celého ústrojí [39], jako např. u prototypu Michelin Active Wheel na obr. 2.11. Výhodou tohoto řešení je získání dalšího prostoru pod kapotou. Nevýhodou je omezený instalační prostor v kole, složitost celého systému (obzvláště s integrovaným aktivním tlumením) a především zvýšené nebezpečí poškození celé pohonné jednotky spolu s kolem či nápravou. I u této koncepce je vozidlo nepojízdné při poruše jednoho z pohonů. Tento typ hnacího ústrojí je dnes již technologicky plně způsobilý pro nasazení v běžných osobních vozidlech. Prakticky se však kvůli výše zmíněným nedostatkům dosud objevuje pouze ve fázi konceptů vozidel.



Obrázek 2.11: Hnací ústrojí Michelin Active Wheel [40]

**Uspořádání d)** umožňuje nejdokonalejší dávkování momentu a přenos trakčních sil na vozovku, obzvláště v hraničních situacích. Teoreticky rovněž dosahuje nejvyšší efektivity při zpracování brzděné energie vozidla, díky absenci mechanických převodů a tím i jejich vůlí, pasivních odporů a zejména jejich momentu setrvačnosti. V této oblasti dominují pomaloběžné mnohopólové PMSM s rotačním pláštěm, disponující potřebnou specifickou hustotou momentu až  $26 \text{ Nm kg}^{-1}$  a  $53 \text{ Nm l}^{-1}$ . Ty mohou být zastavěny přímo do kol se standardním nábojem a to včetně výkonové elektroniky. Pro vozidla kategorie M1 se zajímavou jízdní dynamikou bývá minimální požadavek na velikost disku 18" a větší. Vlastní instalace motorů s rotačním pláštěm přímo do kol ale vždy zvýší neodpruženou hmotu náprav. Například sestava pohonu ProteanDrive™, vyobrazená na obrázku 2.12, váží 34 kg. Tato problematika byla v posledních desetiletích podrobně zpracována [41][42][43], a zdá se být v moderních návrzích tlumení již uspokojivě vyřešena. Přesto v případě požadavku na úplné odstranění problémů s neodpruženou hmotou náprav, mohou být motory umístěny centrálně ve voze a kola pohánět přes příčné hnací hřídele. Toto řešení využívá např. prototyp sportovního vozu StudentCar SCX [44], vyvíjený na VŠB TU Ostrava. Největší nevýhodou tohoto typu hnacího ústrojí je tak především náročnost návrhu a tedy i cena vlastních elektromotorů [45], která jej stále diskvalifikuje z nasazení v sériově vyráběných osobních automobilech. V současnosti je však již poměrně rozšířeno v kategorii jednostopých a různých speciálních vozidel.



**Obrázek 2.12:** Hnací ústrojí Protean Electric ProteanDrive™ [46]

Při uspořádání hnacího ústrojí dle a)–d) závisí dynamika jízdy i účinnost pohonu zcela na parametrech použitých elektromotorů. Z pohledu dynamiky jízdy představuje u těchto koncepcí největší problém strmý pokles dostupného momentu a tedy i zrychlení vozidla ve vyšších rychlostech. Řešení v podobě instalace výkonnějšího motoru ale obvykle nečiní problém vzhledem k vysoké specifické výkonové hustotě ( $\text{W kg}^{-1}$  i  $\text{W l}^{-1}$ ) moderních střídavých strojů. Problematický ale může být následný dopad na celkovou účinnost hnacího ústrojí během běžného provozu, neboť elektromotor je po většinu jízdy zatěžován pouze zlomkem svého jmenovitého výkonu. Právě při velmi nízkém zatížení klesá účinnost elektrických motorů běžně

až k 60 %. Jediným řešením v těchto případech je hledání nových návrhů, již tak vysoce sofistikovaného, magnetického obvodu moderních trakčních elektromotorů. To ovšem značně prodražuje vývoj a především produkční cenu takového motoru. Následující dvě koncepce e) a f) využívají vybraná technická řešení pro efektivní využití momentové charakteristiky elektromotoru, respektive jeho mapy účinnosti [47].

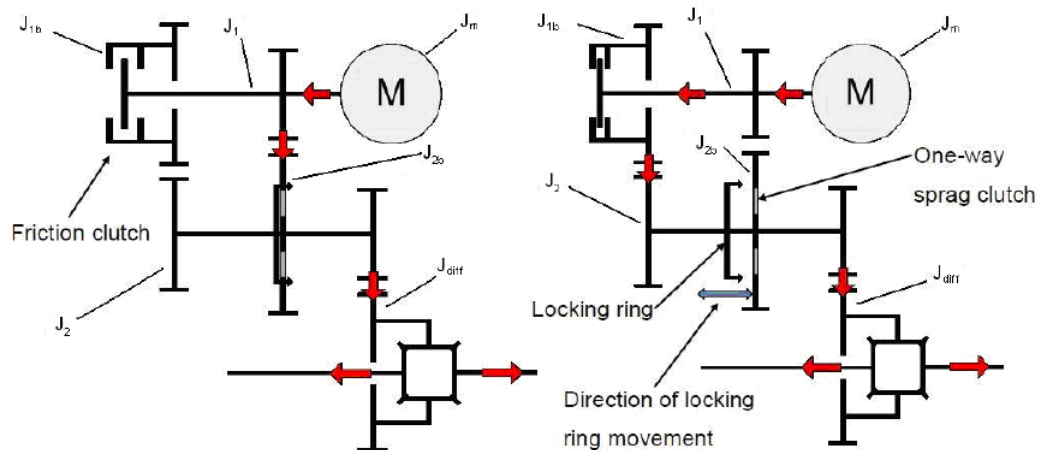
**Uspořádání e)** využívá pro zlepšení parametrů hnacího ústrojí vhodný typ vícerychlostní automatické převodovky MST. Hlavním cílem algoritmu řazení je pak efektivně využívat momentovou charakteristiku elektromotoru [48]. Tímto lze významně zlepšit celkovou dynamiku jízdy vozidla oproti hnacímu ústrojí se SST, nebo zajistit stejnou dynamiku jízdy s menším motorem. Algoritmus může být také nalaďen na udržování pracovního bodu elektromotoru v oblasti blízké jeho maximální účinnosti. Toto hnací ústrojí často ke své činnosti vyžaduje spojku, a tak umožňuje zcela odpojit motor od kol v režimu plachtění, nebo tažení vozidla. Mezi hlavní nevýhody tohoto ústrojí patří především vyšší konstrukční náročnost a rozměry převodovky, ale i obvykle nižší účinnost většiny koncepcí MST oproti SST.

Jako principiálně nejvýhodnější se jeví použití převodovky typu CVT či IVT [49]. Právě plynulá změna převodového stupně umožňuje optimální přizpůsobení vlastností trakčního elektromotoru daným požadavkům. Změna převodového stupně navíc není doprovázena výpadkem přenosu točivého momentu na kola. Výhodou je i kompaktnost provedení takovéto převodovky. Bohužel moderní CVT stále vykazují signifikantně nižší účinnost proti SST. Vybrané koncepce moderních CVT sice disponují špičkovou účinností až 93 % [50], nicméně účinnost dle zatížení a zvoleného převodového poměru běžně klesá až k 50 %. Problémem je i vyšší opotřebení mechanismu při velké skokové změně přenášeného točivého momentu, kterým moderní trakční elektromotory disponují. Z hlediska stanovených kritérií tak použití tohoto typu převodovky nepřináší očekávaný benefit.

Další volbou je MST s diskretním počtem řaditelných stupňů. Největšího přínosu je obvykle dosaženo se dvěma rychlostními stupni [51][52]. Větší počet již nepřináší významné zlepšení, avšak obvykle znamená značný nárůst složitosti i rozměrů ústrojí. První převodový stupeň je volen z hlediska maximalizace dynamiky jízdy nebo účinnosti. Druhý pro dosažení maximální rychlosti při požadovaných otáčkách elektromotoru. Celková účinnost tohoto typu MST je jen nepatrně nižší než u SST. Zásadním problémem je zde ale zajistit řazení rychlostních stupňů bez narušení plynulosti přenosu hnací síly na vozovku, rozpoznatelné běžným řidičem. Tomuto požadavku se nejvíce přibližují převodovky typu DCT<sup>9</sup>. Principiální schéma funkce dvourychlostního prototypu DCT, navrženého pro BEV, je zobrazeno na obr. 2.13.

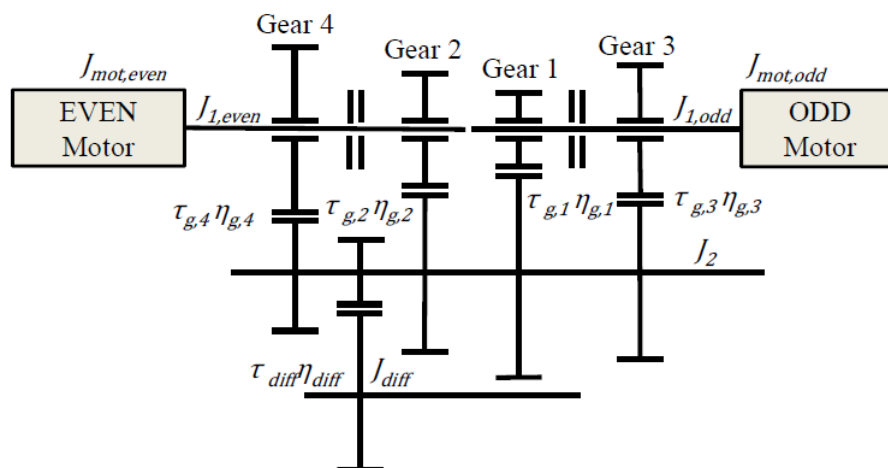
<sup>9</sup> Pro DCT převodovky řady DQ koncernu VW je uváděna teoretická rychlost řazení 8 ms pokud se řadí na připravený stupeň (v případě, že na druhé větvi už je předřazena požadovaná rychlost). Pokud je řazeno nečekaně, tedy mechanismus musí ještě před připnutím přeradit, tak se udává 600 ms. V praxi je ten čas samozřejmě omezený motorem, který si nejprve přesně přednastaví otáčky před připnutím spojky, čímž dochází i k menšímu výpadku přenášeného momentu. Vlastní přerazení pak probíhá tak, že v jeden okamžik jsou v záběru obě spojky (v prokluzu) a výsledkem je celkem jemný přechod. [Osobní komunikace s Ing. Michalem Novákem, ŠKODA AUTO a.s.]





**Obrázek 2.13:** Schéma možného přenosu točivého momentu na kola u DCT. *vlevo:* Při zařazeném prvním převodovém stupni. *vpravo:* Zařazeném druhém stupni [52]

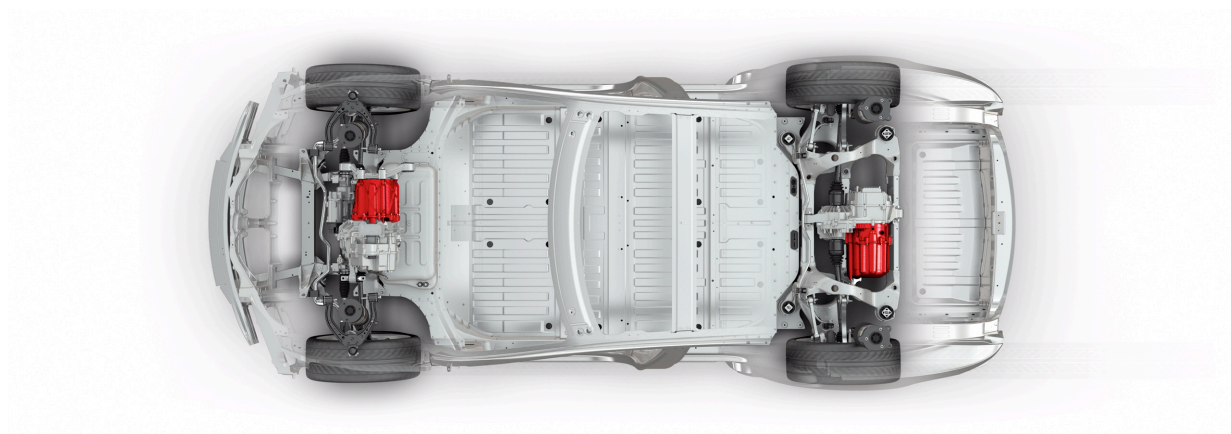
Mezi nejpokročilejší koncepty MST pak patří ústrojí Seamless Electric Drive (SED) [53]. Tato jsou inspirována DCT, kde ale principiální funkci spojek nahrazují dva elektromotory. Největší výhodou proti DCT je to, že krom zmíněné absence spojek a synchronů je možné, aby byly trvale v provozu oba motory. To v případě přítomnosti čtyř diskretních rychlostních stupňů znamená až devět možných provozních stavů viz obr. 2.14. Toto ústrojí je v konečném důsledku technologicky jednodušší jak na výrobu, tak požadavky na algoritmus řazení, než konvenční DCT. V současnosti již toto ústrojí komerčně nabízí společnost Zytec Automotive Ltd. pod označením Zytec Twin 25kW. Převodovku dodává společnost Vocis Graziano.



**Obrázek 2.14:** Schéma prototypu čtyřrychlostního 4SED. Každý motor je pevně spojen se svou vstupní hřídelí (jedna hřídel nese dva sudé „EVEN“ a druhá dva liché „ODD“ převody). Možné provozní stavy jsou: 1) zařazen první a druhý stupeň, 2) první a čtvrtý stupeň, 3) druhý a třetí stupeň, 4) třetí a čtvrtý stupeň, 5) pouze první stupeň, 6) pouze druhý stupeň, 7) pouze třetí stupeň, 8) pouze čtvrtý stupeň, a 9) žádný zařazený stupeň [53]

**Uspořádání f)**, označované také jako Dual Motor Drive System (DMDS) využívá pro zlepšení parametrů hnacího ústrojí dvou odlišných elektromotorů, sdílejících společnou SST. V případě požadavku na AWD, lze koncept upravit na kombinaci dvou soustrojí motoru s vlastní převodovkou, instalovaných u obou náprav [54]. Převodovky pak mohou disponovat odlišnými převodovými poměry. Princip činnosti ale zůstává stejný. Pokročilý algoritmus řízení trvale udržuje pohon v oblasti maximální účinnosti pomocí sdruženého řízení momentu obou motorů. DMDS tak optimalizuje účinnost hnacího ústrojí pro většinu provozních podmínek. Například lze trvale používat pouze jeden motor, speciálně navržený pro plynulou jízdu při nízkém zatížení a druhý, asistenční motor, připojovat pouze v případě vysokého zatížení, nebo požadavku na vysokou akceleraci či rekuperační brzdění. Přitom připojení, respektive odpojení druhého motoru probíhá v řádu ms a tedy nijak nenarušuje plynulost jízdy. Tento typ hnacího ústrojí zároveň disponuje principiální redundancí, kdy v případě nekritické závady může vozidlo nouzově pokračovat v jízdě jen na jeden motor.

Technologická výhoda DMDS, zejména vůči hnacím ústrojím s MST, spočívá v dosažení lepšího rozložení hmotnosti vozidla a účinnosti chlazení jednotlivých součástí při zachování kompaktního provedení. Převodovka pro DMDS není technologicky náročnější než běžná SST. Obvykle se liší pouze přítomností druhé příruby pro asistenční motor. Motory pro DMDS rovněž mohou disponovat užším pásmem vysoké účinnosti a přitom celková dosahovaná efektivita ústrojí může být stejná nebo i lepší než u SST s jedním vysoce efektivním motorem. Jako asistenční elektromotor, je obecně nezbytné volit takový typ, který při volném protáčení generuje co možná nejmenší ztráty ve svém magnetickém obvodu. Z tohoto pohledu se jeví jako nejvýhodnější typ ACIM, kde v tomto režimu není velkým nedostatkem jeho poměrně úzké pásmo vysoké účinnosti, zejména při srovnání s PMSM. Na základě výše uvedených vlastností lze konstatovat, že DMDS v současné době patří mezi jeden z nejperspektivnějších konceptů hnacího ústrojí pro BEV.



**Obrázek 2.15:** Tesla Model S s hnacím ústrojím DMDS. Vozidlo využívá hlavního zadního a předního asistenčního pohonu s asynchronními motory s SST. Přední, méně výkonný, motor disponuje plochou momentovou charakteristikou, která zajišťuje vozidlu dostatečný hnací moment i ve vysokých rychlostech [54]

### 2.3.1 Dynamika jízdy motorových vozidel

Simulace dynamiky jízdy vozidla vychází z matematicko-fyzikálního aparátu, využívajícího zejména Newtonových zákonů. Tyto popisují rovnováhu sil a momentů působících na vozidlo v klidu (2.2)(2.3)(2.4) a pohybu (2.5)(2.6)(2.7). Principem superpozice pak lze sestavit fundamentální pohybovou rovnici (2.8), kde na jedné straně vystupuje dostupná hnací síla působící na kolech vozidla, a na druhé straně součet všech působících jízdních odporů<sup>10</sup>. Vlastní rovnováhu sil působících na vozidlo, lze díky moderní výpočetní technice, řešit velmi přesně jak analyticky, tak i numericky. Jedním z komplexních nástrojů je například ADVISOR [55], využívající programovací prostředí MATLAB. Na druhou stranu právě ona komplexnost výpočtu bývá často hlavním zdrojem komplikací, neboť k dosažení správných výsledků je třeba zadat množství koeficientů, které lze bez jejich přímého měření na konkrétním vozidle jen velmi obtížně získat.

Problematika výpočtu dynamiky jízdy tak bývá běžně simplifikována. Zjednodušením se v tomto kontextu myslí vypuštění rovnic některých závislostí, pro které je velmi obtížné nalézt nebo změřit dosazované hodnoty. Tyto závislosti jsou obvykle nahrazovány pomocí empiricky zjištěných konstant, např. součinitele valivého odporu, či součinitele rotačních součástí hnacího ústrojí. Tyto konstanty poskytují obvykle velmi dobrou aproximaci. Pro čistě analytické řešení bývá největší překážkou fakt, že dostupnou hnací sílu na kolech vozidla v praxi získáváme přepočtem z naměřené momentové charakteristiky motoru vozidla, kde tato bývá k dispozici ve formě nespojitých dat. Pokud je navíc vyžadována simulace průběhu účinnosti hnacího ústrojí, je vygenerování přesného průběhu funkce obvykle náročné a simulační nástroje tak často využívají numerického řešení.

Rovnováha sil a momentů, působících na vozidlo zaparkované na rovině:

$$\sum F_x = 0 \quad (2.2)$$

$$\sum F_z = 0 \quad (2.3)$$

$$\sum M_y = 0 \quad (2.4)$$

Rovnováha sil a momentů, působících na vozidlo v pohybu na rovině:

$$\sum F_x = F_k \quad (2.5)$$

$$\sum F_z = 0 \quad (2.6)$$

$$\sum M_y = 0 \quad (2.7)$$

---

<sup>10</sup> Na celkovou dynamiku jízdy mají obecně vliv i síly, působící v příčném směru vůči pohybu vozidla. V praxi je však dynamika jízdy a především spotřeba dle normalizovaných jízdních cyklů ověřována v laboratoři, vozidlem umístěným na válcové brzdě. Vliv sil, působících mimo podélnou osu vozidla, je tak obvykle zcela potlačen. Z tohoto důvodu s nimi simulace nepočítá.

Vyjádření potřebné hnací síly vozidla pro překonání jízdních odporů:

$$F_k = \sum_i O_i \quad (2.8)$$

po dosažení signifikantních jízdních odporů, působících na vozidlo:

$$F_k = O_f + O_v + O_s \pm O_a \quad (2.9)$$

Jízdní odpory lze chápat jako síly působící proti pohybu vozidla. Výčet nejvýznamnějších jízdních odporů je uveden v rovnici (2.9). Mezi tyto se ještě zahrnuje odpor přivěsu, se kterým se však běžně u vozidel kategorie BEV nepočítá, a proto není v této rovnici uveden. Dále jsou v textu uvedeny fundamentální rovnice použité pro výpočet jednotlivých jízdních odporů a tabulky koeficientů do nich vstupujících. Další rozbor dané problematiky lze nalézt například v [56][57].

**Odpor valivý** vzniká deformací kol vozidla i vozovky při vzájemném valivém pohybu. Vozovka se obvykle uvažuje jako dokonale tuhá a u silničních vozidel se tak kalkuluje pouze s deformací pneumatiky. Deformace se projevuje stlačením v její přední části. V zadní části dochází k jejímu opětovnému vyrovnání do kruhového tvaru. Tímto jevem vznikají energetické ztráty, které jsou vyjadřovány ve formě sil působících proti směru pohybu vozidla. Valivý odpor závisí především na povrchu vozovky, ale ovlivňují jej i další veličiny, jako jsou rychlost vozidla a deformace kola (u pneumatik má značný vliv jejich nahuštění). Vliv rychlosti se začíná citelně uplatňovat až od rychlosti cca 80 km h<sup>-1</sup> pro osobní vozidla [56]. Valivý odpor tak lze pro účely této simulace považovat za nezávislý na rychlosti<sup>11</sup> a vycházet tak pouze z jeho aproximace hodnotou součinitele valivého odporu pro daný povrch vozovky, násobeného svislou složkou působící tíhové síly.

$$O_f = f \sum_i Z_i = f G \cos \alpha \quad (2.10)$$

**Odpor vzdušný** je vyvolán působením prostředí, obtékajícího kolem vozidla během jeho pohybu. V zemské atmosféře se jedná právě o odpor vzduchu. Je možné jej rozdělit do několika složek, kde mezi nejvýznamnější patří tlakový a třecí odpor. Dále se na něm podílí indukovaný odpor, odpor průchodem vzduchu chladicím a klimatizačním systémem vozidla, v neposlední řadě také odpor vznikající od otáčejících se kol. Celkový vzdušný odpor je určen následujícím aerodynamickým vztahem

$$O_v = \frac{1}{2} \rho_v C_x S_x v_r^2 \quad (2.11)$$

<sup>11</sup> Pro jízdní cyklus NEDC se pouze méně než 5 % z celkového jízdního času uskutečňuje při rychlosti nad 80 km h<sup>-1</sup>. Cyklus FTP 75 pak počítá s krátkodobou maximální rychlostí vozidla 90 km h<sup>-1</sup>.

**Odpor stoupání** vyjadřuje silové působení na těleso na nakloněné rovině. Vozovka svírá s vodorovnou základnou úhel  $\alpha$  a odpor stoupání pak tvoří složka síly vodorovná s vozovkou. Při jízdě ze svahu odpor stoupání analogicky nabývá záporných hodnot. Tento odpor působí v těžišti vozidla.

$$O_s = \pm G \sin \alpha \quad (2.12)$$

Velice často se místo úhlu naklonění vozovky používá sklon vozovky  $s$ , který je definován převýšením vozovky  $h_v$  vztaženým na délku jejího průmětu do vodorovné roviny  $l_v$ . Výsledek je pak udáván v procentech. Vztahy pro přepočet jsou uvedeny v následujících rovnicích.

$$s = \frac{h_v}{l_v} = \tan \alpha \quad (2.13)$$

$$O_s = \pm G \arctan(s) \quad (2.14)$$

**Odpor zrychlení** je možno charakterizovat jako reakci setrvačných sil, působící proti směru pohybu vozidla. Lze jej popsat obecným vztahem (2.15), ve kterém působí složka odporu posuvných částí  $O_{zp}$  a složka odporu všech rotačních součástí  $O_{zr}$  vozidla. Posuvné složky sil se ve vozidlech obvykle neuplatňují. Mezi nejvýznamnější rotační části ve vozidle pak patří hnací ústrojí a jednotlivá kola.

$$O_a = O_{zp} + O_{zr} \quad (2.15)$$

Dosazením za jednotlivé složky získáme výsledný vztah

$$O_{zr} = \left[ 1 + \frac{(J_m \dot{\vartheta}_c^2 + J_p \dot{\vartheta}_r^2) \eta + \sum_i J_{ki}}{r_d^2} \right] m \frac{dv(t)}{dt} \quad (2.16)$$

Z rovnice (2.16) plyne, že výpočet je závislý na hmotnostním momentu setrvačnosti jednotlivých rotačních součástí motoru  $J_m$  a převodovky  $J_p$ , viz. obr. 2.13 a 2.14. V případě simulace vozidla s víceústupňovou převodovkou je třeba provést výpočet vždy pro aktuálně zařazený rychlostní stupeň. V praxi je však velmi obtížné získat potřebné údaje pro konkrétní soustrojí, a proto se nahrazuje výpočet složky odporu rotačních částí vozidla  $O_{zr}$  pomocí součinitele rotačních částí  $\vartheta_i$ , dosazovaného na základě empirických vztahů odvozených např. v [56].

$$O_a = \vartheta_i m \frac{dv(t)}{dt} = \vartheta_i m a \quad (2.17)$$

- **Hnací síla a její přenos na vozovku**

Sílu generovanou ideálním bezpřevodovým hnacím ústrojím vozidla vyjadřujeme obecně jako sumu hnacích momentů všech činných motorů, dělenou dynamickým poloměrem kol vozidla dle následujícího vztahu

$$F_k = \sum_i \frac{M_{mi}}{r_d} \quad (2.18)$$

Pro vozidla, jejichž hnací ústrojí využívá mechanických převodů, pak pro každý převodový stupeň platí rovnice (2.19), ve které vystupuje celkový převodový poměr převodovky  $i_C$  a celková účinnost hnacího ústrojí  $\eta_C$ . Typické ústrojí se obvykle skládá z jednoho nebo více vlastních převodů a rozvodovky s diferenciálem.

$$F_k = \frac{M_m i_C \eta_C}{r_d} \quad (2.19)$$

$$i_C = i_i i_r \quad (2.20)$$

$$\eta_C = \eta_i \eta_r \quad (2.21)$$

- **Rychlost jízdy vozidla na jednotlivé převodové poměry**

Maximální rychlost jízdy vozidla na daný převodový stupeň  $v_{pi}$  je limitována momentovou charakteristikou trakčního motoru. Tj., při jakých otáčkách je motor ještě schopen produkovat takovou hnací sílu, která dokáže překonat jízdní odpory (2.8). Po dosazení hodnot vyjádříme z potřebné hnací síly  $F_k$  (2.19) moment motoru  $M_m$  (2.22) a z momentové charakteristiky pak odečteme jeho otáčky  $n_m$  odpovídající vypočtenému momentu  $M_m$ .

$$M_m = \frac{F_k r_d}{i_C \eta_C} \quad (2.22)$$

$$v_{pi} = \frac{2\pi n_m r_d}{i_C} \quad (2.23)$$

- **Stoupavost vozidla na jednotlivé převodové poměry**

Pro výpočet stoupavosti vozidla platí podmínka ustáleného pohybu konstantní rychlostí. Ve výpočtu není zahrnut vliv přilnavosti vozovky. Vycházejme z rovnice

$$F_{ki} = O_f + O_v + O_s \quad (2.24)$$

Pro malé sklony vozovky lze uvažovat zjednodušení v podobě (2.25)(2.26). Poté lze z rovnice měrných sil vyjádřit bezrozměrný dynamický součinitel  $D_i$  pro jednotlivé převodové stupně (2.27)

$$\cos \alpha \approx 1 \quad (2.25)$$

$$\sin \alpha \approx \tan \alpha = s \quad (2.26)$$

$$D_i = \frac{F_{ki} - O_v}{G} = f \cos \alpha + \sin \alpha \quad (2.27)$$

a následně substitucí, kde  $s$  je sklon vozovky viz. rovnice (2.13)

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - \tan^2 \alpha}} = \frac{1}{\sqrt{1 - s^2}} \quad (2.28)$$

$$\sin \alpha = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 - \tan^2 \alpha}} = \frac{s}{\sqrt{1 - s^2}} \quad (2.29)$$

získat výslednou rovnici maximální stoupavosti vozidla  $s$ <sup>12</sup>

$$s = \frac{-f \pm D_i \sqrt{1 + f^2 - D_i^2}}{1 - D_i^2} \quad (2.30)$$

#### • Akcelerace a brzdění vozidla na jednotlivé převodové poměry

Výpočet akcelerace vozidla na rovině za bezvětří a bez vlivu přilnavosti vozovky vychází z obecné rovnice

$$F_{ki} = O_f + O_v \pm O_a \quad (2.31)$$

Po dosazení (2.17) lze vyjádřit přímo akceleraci pro každý převodový poměr  $a_i$ .

$$a_i = \frac{F_{ki} - O_f - O_v}{m \vartheta_i} \quad (2.32)$$

Pro posuzování dynamických parametrů vozidla v běžném provozu se však vyjádření okamžitého zrychlení nehodí z důvodu jeho funkční závislosti na rychlosti jízdy. Je tak výhodnější posuzovat dostupnou akceleraci vozidla jako minimální čas potřebný k dosažení požadované rychlosti. Například zrychlení z  $0-100 \text{ km h}^{-1}$  za 10 s. K vytvoření takovéto závislosti je třeba u vícerychlostních převodovek vypočítat hodnoty okamžitého zrychlení pro každý převodový stupeň (2.32), dále pak stanovit průměrný čas  $t_r$ , potřebný k zařazení dalšího rychlostního stupně, během kterého se vozidlo pohybuje se sníženou hnací silou, nebo zcela bez její přítomnosti<sup>13</sup>. Následně lze vypočítat zpomalení vozidla  $a_z$ <sup>14</sup> (2.33) a úbytek rychlosti vozidla  $v_z$  (2.34).

$$a_z = -\frac{O_f + O_v}{m \vartheta_r} \approx \text{konst.} \quad (2.33)$$

$$v_z = \int_0^{t_r} a_z dt_r = v_0 - a_z t_r \quad (2.34)$$

Během řazení tedy dochází ke zpomalení vozidla působením jízdních odporů. Přitom se uplatňuje i jiný součinitel rotačních částí vozidla  $\vartheta_r$ . Průměrná doba řazení jednotlivých rychlostních stupňů synchronizované manuální převodovky osobních automobilů bývá udávána v rozmezí 0,8–1,2 s [56]. Jízdní cyklus NEDC pak předepíše dobu řazení v délce 2 s. U automatizovaných převodovek doba řazení v průměru nepřekračuje 0,5 s. DCT běžně řadí na připravený stupeň do 0,1 s.

<sup>12</sup> Jedná se o běžně užívanou bezrozměrnou veličinu, kde 100 % odpovídá stoupání svahu 45°.

<sup>13</sup> Přenos hnací síly na kola vozidla je částečně omezen při prokluzu spojky u DCT, respektive rozpojenou spojkou zcela přerušen u manuálně řazené převodovky.

<sup>14</sup> V tomto případě se obvykle aplikuje zjednodušení, kdy zpomalení vozidla považujeme za konstantní, vzhledem k relativně krátké době řazení.



V praxi se pro simulaci doby akcelerace používá numerické řešení, vycházející z naměřené momentové charakteristiky, respektive mapy účinnosti daného stroje. Princip numerických metod je obvykle velmi přímočarý a vede k dostatečně jemnému navzorkování momentové charakteristiky, kde pro každý úsek zvlášť je vypočtena počáteční ( $n$ ) a konečná ( $n+1$ ) hodnota okamžitého zrychlení dle (2.33). Pak lze určit střední hodnotu zrychlení  $\bar{a}_i$  na daný převodový poměr v daném úseku. Ze znalosti zrychlení lze derivací vyjádřit dobu akcelerace v daném úseku.

$$\bar{a}_i = \frac{a_{i(n)} - a_{i(n+1)}}{2} = \frac{\Delta v}{\Delta t_{(n)}} \Rightarrow \Delta t_{(n)} = \frac{\Delta v}{\bar{a}_i} \quad (2.35)$$

Celkovou dobu akcelerace pak vyjadřuje sečtení všech úseků:

$$t = \sum_i \Delta t_{(n)} \quad (2.36)$$

#### • Kontrola překročení jízdních mezí vozidla

Je nezbytná pro ověření, zda-li dostupná hnací síla je vůbec přes kola přenositelná na vozovku, resp. jestli lze využít všechnu dostupnou brzdnu sílu motoru pro rekuperaci bez prokluzu kol. V tomto ověření hraje důležitou roli geometrie umístění těžiště ve vozidle a součinitel adheze  $\mu$ , působící mezi pneumatikou a vozovkou. Koeficient  $\mu_v$  je závislý jak na povrchu dané vozovky, tak také na rychlosti vozidla, dle rovnice (2.37), odvozené z grafického vyjádření [58].

$$\mu_v = 3e^{-5}\mu^2 - 0,0075\mu + 1,0121 \quad (2.37)$$

Vzhledem k tomu, že dostupný moment trakčních motorů rovněž klesá s rychlostí jízdy vozidla, má součinitel adheze obvykle největší vliv z hlediska limitace počátečního zrychlení vozu a při strmém stoupání vozidla. V obou případech se pneumatika odvaluje bez prokluzu pokud platí vztah:

$$H_z = \mu_v Z_k \quad (2.38)$$

Dále do výpočtu vstupuje parametr ( $xWD$ ), zda-li je hnaná přední ( $FWD$ ), zadní ( $RWD$ ), případně obě nápravy ( $AWD$ ). Pro výpočet maximálního dosažitelného zrychlení vozidla na rovině pak platí přímý výpočet obvodové síly dle vztahu:

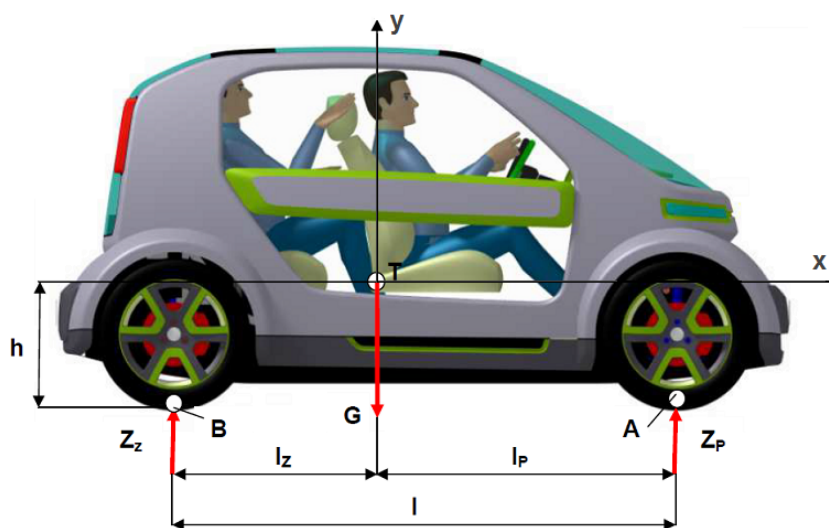
$$H_{max(xWD)} = O_f + \frac{G}{g} a = \mu_v Z_{(xWD)} \quad (2.39)$$

$$a_{max(RWD)} \leq \frac{\mu_v \frac{l_p}{l} - f \frac{l_z}{l}}{1 - \frac{h}{l} (f - \mu_v)} g \quad (2.40)$$

$$a_{max(FWD)} \leq \frac{\mu_v \frac{l_z}{l} - f \frac{l_p}{l}}{1 - \frac{h}{l} (f + \mu_v)} g \quad (2.41)$$



Určení těžiště vozidla je pak zobrazeno na obrázku 2.16.



Obrázek 2.16: Určení působíště reakce náprav  $Z$  a geometrické polohy těžiště

### 2.3.2 Popis navrženého simulačního prostředí

V současné době je k dispozici množství prostředí pro simulaci motorových vozidel. Mezi ty nejkomplexnější se řadí například ADVISOR, vyvinutý americkou laboratoří NREL. Nebo prostředí dSPACE od stejnojmenné americké společnosti dSPACE Inc., které navíc umožňuje simulace typu HIL<sup>15</sup>. Obě jsou úzce svázány s prostředím MATLAB, které v sobě rovněž implementuje vlastní výkonné nástroje pro simulaci dynamiky jízdy vozidel. Nicméně právě závislost na MATLABu stále tvoří překážku k široké distribuci výsledků mezi studenty, především díky potřebě nezbytného minima znalostí principu činnosti specializovaných prostředí. Vědomí toho, že fundamentální rovnice simulace dynamiky jízdy jsou poměrně přímočaré, mne vedlo k vytvoření vlastního simulačního prostředí v programu Microsoft Excel i s předpokladem, že některé závislosti musí být zadány ručně. Prostor ADVISOR jsem používal pro ověření funkčnosti a vybrané specializované simulace.

#### • Simulace dynamiky jízdy vozidla

Simulační prostředí se skládá ze dvou částí. V první části se nachází tabulkové prostředí pro vkládání parametrů viz. obrázek 2.17, kde jsou zde umístěny výstupy pro vypočítané numerické hodnoty a grafy. Druhá část slouží pro vkládání momentové charakteristiky a mapy účinnosti použitých elektromotorů spolu s předpisem požadovaného jízdního cyklu. Na základě vložených parametrů převodového ústrojí<sup>16</sup>, parametrů vozidla a okolního prostředí jsou provedeny výpočty jízdních odporů.

<sup>15</sup> Hardware-in-the-loop (HIL) umožňuje vytvořenou simulaci validovat na konkrétním HW.

<sup>16</sup> Simulace umí počítat s vícestupňovou převodovkou nebo jedním pevným převodem

vozidlo: **ESUS GENERATION 1**

šířka pneu	profil pneu	disk R	poloměr kola	obvod kola	převodový poměr	účinnost převodů	souč. rotačních částí $v^{(2)}$	hmotnost NEDC <sup>(1)</sup>	souč. přílnavosti $\mu_v^{(2)}$	přední nápravy $l_p$	zadní nápravy $l_z$	rozvor náprav $l$	výška těžiště $h$
mm	mm	inch	mm	mm	[-]	[-]	[-]	kg	[-]	m	m	m	m
195 / 55	R 15		297,75	1870,82	hodnoty pro jeden pevný převod			625	0,8	0,9848	1,4772	2,462	0,65

převodovka MQ200		$i_{pl}$ [-]	$\eta_{pl}$ [-]	$v_{pl}^{(2)}$ [-]
1. rychlostní stupeň		3,62	0,93	1,3
2. rychlostní stupeň		1,95	0,94	1,2
3. rychlostní stupeň		1,28	0,95	1,1
4. rychlostní stupeň		0,93	0,95	1,05
5. rychlostní stupeň		0,74	0,95	1,04
6. rychlostní stupeň		0,61	0,96	1,03
rozvodovka - SP		3,933	0,9	1,04

g	9,81	$m/s^2$
f	0,01	-
$\rho$	1,25	$kg/m^3$
$c_x$	0,60	-
$S_x$	1,10	$m^2$

omezení počátečního zrychlení adhezi<sup>(3)</sup>

$a_{zadní\_max}$ $ms^{-2}$	$a_{přední\_max}$ $ms^{-2}$
3,91	3,84

dobu řazení:  sec

otáčky řazení:  rpm

1) pro simulaci jízdního cyklu NEDC je počítáno s pohotovostní hmotností + 75 kg  
2) empiricky zjištěné hodnoty  
3) na rovině, valivý odpor zanedbán

Obrázek 2.17: Grafické prostředí pro vkládání parametrů simulace

Dostupná hnací síla na kolech je počítána z momentové charakteristiky motoru. Dle vztahů a závislostí uvedených v oddílu 2.3.1 jsou pak automaticky dopočítány a graficky reprezentovány:

1. **Hnací síla na kolech** vozidla pro daný rychlostní stupeň.
2. **Okamžité zrychlení** vozidla pro daný rychlostní stupeň a rychlost jízdy.
3. **Časový průběh zrychlení** vozidla na maximální dosažitelnou rychlost.
4. **Stoupavost** vozidla na daný rychlostní stupeň.

## • Simulace spotřeby vozidla

Pro možnost vzájemného srovnání spotřeby vozidel se spalovacím motorem, hybridů a elektromobilů<sup>17</sup> se používá množství standardizovaných jízdních cyklů<sup>18</sup> s přesně definovanými podmínkami<sup>19</sup>. V EU je pro vozidla kategorie M1<sup>20</sup> používán jednotný cyklus NEDC spravovaný organizací UNECE. V USA se pod správou agentury EPA používá soubor cyklů FTP 75, HWFET a US06 (SFTP). V Japonsku pak cyklus JP08. Vzhledem k celosvětově roztržité metodice testování spotřeby a emisí vozidel se dlouhodobě uvažuje o její harmonizaci v podobě jednotného cyklu WLTP.

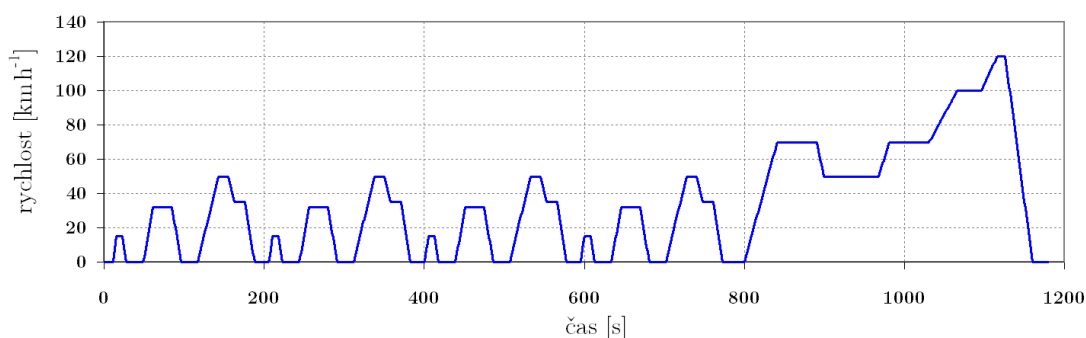
<sup>17</sup> V EU se pro spotřebu pohonných hmot používá standardní jednotka l/100 km. Spotřeba elektrické energie vozidel BEV a HEV pak v kWh/100 km. V USA pak využívají jednotky MPG a MPGe [59].

<sup>18</sup> Měření spotřeby v ustáleném pohybu konstantní rychlostí se dnes již téměř nepoužívá pro svoji odtažitost od reálných podmínek, panujících v provozu na pozemních komunikacích.

<sup>19</sup> Před začátkem jízdního cyklu musí být vozidlo ponecháno po dobu minimálně 6 hodin s vypnutým motorem v prostředí o teplotě v rozmezí 20–30 °C (obvykle 25 °C). Cyklus se sice může zajíždět na rovné silnici a za bezvětří, nicméně ve venkovním prostředí nikdy nelze zaručit dokonalou opakovatelnost, a tak je cyklus dnes výhradně prováděn na válcové brzdě v testovací laboratoři. Během cyklu jsou všechna doplňková zařízení ve vozidle vypnuta (kompresor klimatizace, ventilátor, světla, vyhřívání zadního okna, atd.).

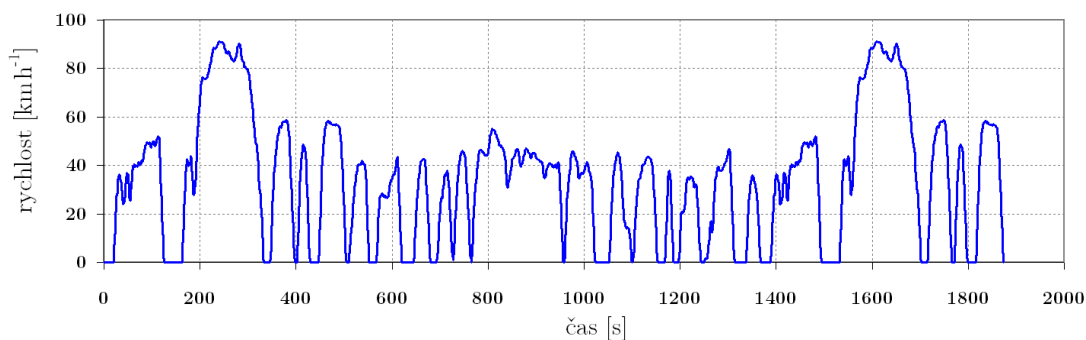
<sup>20</sup> Kromě lehkých nákladních a užitkových vozidel.

**NEDC** v doslovném překladu zkratky znamená „nový evropský jízdní cyklus“. Avšak kompletní cyklus byl zaveden již v roce 1990 a naposledy upraven v roce 1997. Dnes již zcela neodpovídá obecným požadavkům na dynamiku provozu na pozemních komunikacích. Pro vozidla kategorie BEV byly dodatečně upřesněny zkušební podmínky, zejména pak odstranění prodlev během řazení v případě jednorychlostních převodovek. Kompletní NEDC se skládá ze čtyř opakovaných městských jízdních cyklů ECE 15 (UDC), kde vozidlo dosahuje maximální rychlosti  $50 \text{ km h}^{-1}$  a maximálního zrychlení  $1,04 \text{ m s}^{-2}$ . Dále následuje jeden mimoměstský cyklus EUDC, s maximální dosaženou rychlostí  $120 \text{ km h}^{-1}$  a maximálního zrychlení<sup>21</sup>  $0,47 \text{ m s}^{-2}$ . Časový průběh je na obrázku 2.18. Pro vozidla s omezeným výkonem motoru<sup>22</sup> je k dispozici upravená verze EUDC s omezenou maximální rychlostí na  $90 \text{ km h}^{-1}$ .



**Obrázek 2.18:** Časový průběh předepsané rychlosti jízdy dle cyklu NEDC

**FTP 75** je výchozím cyklem metodiky EPA, používané v USA, pro testování spotřeby osobních vozidel. Jedná se primárně o městský cyklus.



**Obrázek 2.19:** Časový průběh předepsané rychlosti jízdy dle cyklu FTP 75

Cyklos NEDC tak lépe vypovídá o účinnosti hnacího ústrojí při úsporné jízdě, kdy hnací ústrojí často pracuje v ustálených otáčkách při nízkém zatížení motoru. Cyklus FTP 75 pak lépe vystihuje dynamickou jízdu a účinnost hnacího ústrojí v přechodových stavech. Simulace spotřeby vozidla dle NEDC je zavedena v simulačním prostředí jako výchozí. Simulace dle FTP 75 slouží pouze jako doplňková a není ve stávající verzi zcela implementována.

<sup>21</sup> Hodnoty zrychlení platí pro cyklus NEDC s vynecháním prodlev 2 s pro řazení.

<sup>22</sup> Jedná se zejména o starší vozidla a vozidla kategorie L7e.

### 2.3.3 Vliv uspořádání hnacího ústrojí na dynamiku jízdy

Pro kompletní simulaci dynamiky jízdy bylo využito univerzální prostředí, popsané v pododdílu 2.3.2. Do prostředí byly zadány parametry virtuálního elektrického vozidla, inspirovaného technickými parametry moderního elektromobilu BMW i3<sup>23</sup>, disponujícího vysokou jízdní dynamikou. Vstupní data pro simulaci vozidla a vlivu okolního prostředí jsou uvedeny na následujícím obrázku.

vozidlo: virtuální vozidlo (BMW i3)

převodovka BW 31-03													
šířka pneu	profil pneu	disk R	poloměr kola	obvod kola	převodový poměr	účinnost převodů	souč. rotačních částí v <sup>2)</sup>	hmotnost NEDC <sup>1)</sup>	souč. přílnavosti $\mu_v$ <sup>2)</sup>	přední náprava I <sub>p</sub>	zadní náprava I <sub>z</sub>	rozvor náprav I	výška těžiště h
mm	mm	inch	mm	mm	[-]	[-]	[-]	kg	[-]	m	m	m	m
155 / 70	R 19		349,80	2197,86	7	0,96	1,1	1270	0,95	1,37	1,2	2,57	0,6

g =	9,81	m/s <sup>2</sup>
f =	0,01	-
ρ =	1,25	kg/m <sup>3</sup>
c <sub>r</sub> =	0,29	-
S <sub>x</sub> =	2,38	m <sup>ε</sup>

převodovka DCT	i <sub>pi</sub> [-]	η <sub>pi</sub> [-]	v <sub>pi</sub> <sup>2)</sup> [-]
1. rychlostní stupeň	9,7	0,96	1,2
2. rychlostní stupeň	6	0,96	1,1

1) pro simulaci jízdního cyklu NEDC je počítáno s pohotovostní hmotností + 75 kg  
2) empiricky zjištěné hodnoty  
3) na rovině, valivý odpor zanedbáván

omezení počátečního zrychlení adheze <sup>3)</sup>	
a <sub>RWD</sub> ms <sup>-2</sup>	a <sub>FWD</sub> ms <sup>-2</sup>
6,23	5,44

dobu řazení:	0,1 sec
otáčky řazení:	7600 rpm

Obrázek 2.20: Parametry simulace virtuálního vozidla

Pro konfrontaci jednotlivých koncepcí hnacích ústrojí byly zvoleny tři moderní jednotky motoru a měniče, reprezentující jak PMSM stroje v provedení IPM a IWM, tak i ACIM. Základní parametry vybraných jednotek jsou uvedeny v tabulce 2.3. Momentové charakteristiky, deklarované výrobcí těchto jednotek, jsou uvedeny na str. 31. Parametry pro převodovky a jejich mapa účinnosti, uvedená na obr. 2.21, vychází z dat modelové řady 31–03 společnosti BorgWagner.

Tabulka 2.3: Přehled vybraných trakčních pohonů pro simulaci

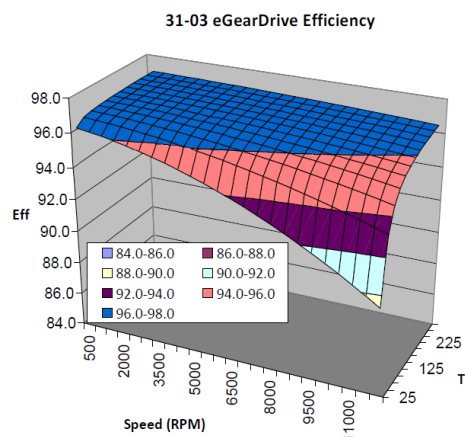
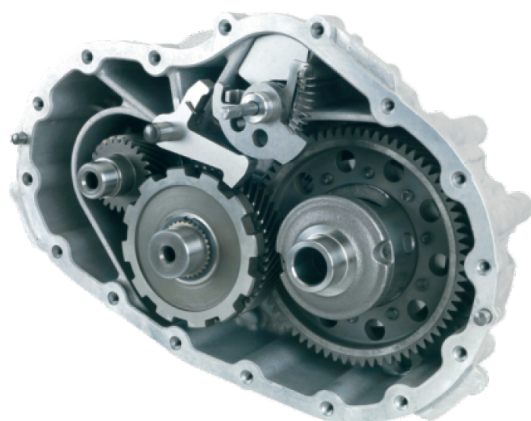
jednotka <sup>a</sup>	parametry točivého stroje					
	max. otáčky	max. výkon	max. moment	specif. <sup>b</sup> výkon	specif. <sup>b</sup> moment	princip stroje
	[ot. min <sup>-1</sup> ]	[kW]	[Nm]	[kW kg <sup>-1</sup> ]	[Nm kg <sup>-1</sup> ]	[-]
Siemens 1PV5135	10 000	150	360	0,97	2,32	ACIM
UQM Tech. PP125	8000	125	300	2,20	5,27	IPM
PMSM–30 <sup>c</sup>	8000	30	80	-	-	IPM
ProtenElectric PD18	1600	75	1000	2,20	26	IWM

<sup>a</sup> Všechny stroje jsou chlazeny kapalinou

<sup>b</sup> Platí pro kompletní jednotku motor+měnič

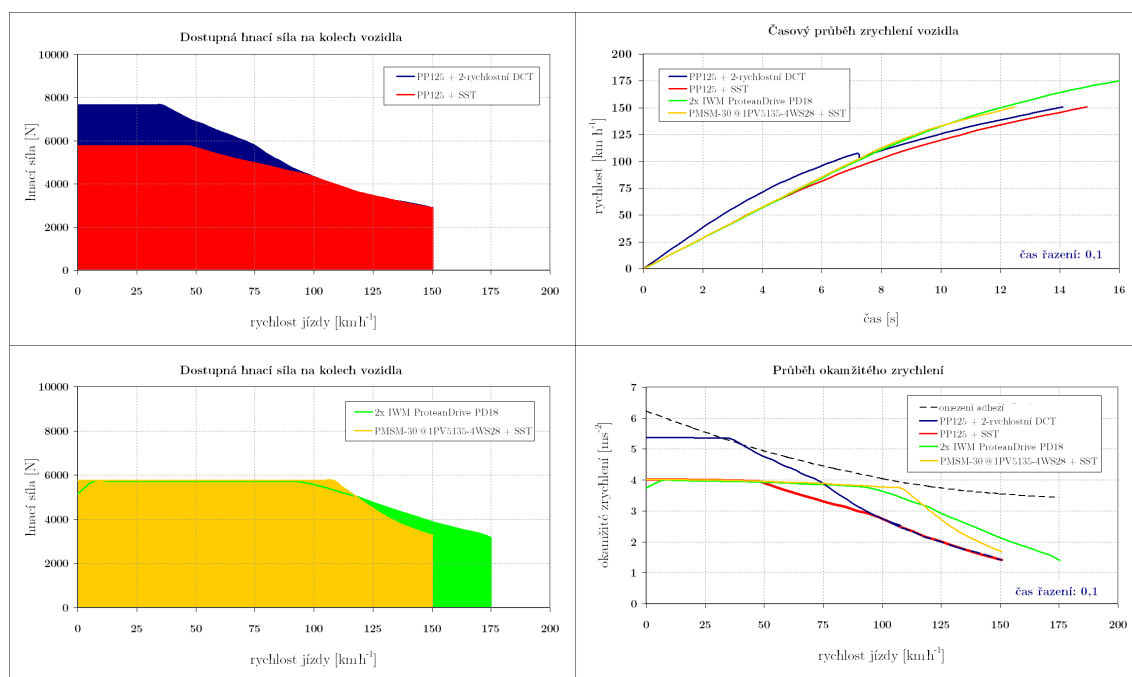
<sup>c</sup> Virtuální PMSM stroj, navržený pro optimální provoz hnacího ústrojí DMDS virtuálního vozidla

<sup>23</sup> Vozidlo BMW i3 bylo vybráno zejména z důvodu jeho vysoké jízdní dynamiky a dále dostupnosti technických parametrů, získaných z katalogových údajů a vyžádaných informací od BMW ČR.



**Obrázek 2.21:** Mapa účinnosti převodovky řady 31–03 společnosti BorgWagner. SST této řady o hmotnosti 28 kg jsou konstruovány na vstupní točivý moment až 300 Nm a disponují účinností  $>96\%$  ve většině pracovního rozsahu [60]

Dynamika jízdy vozidla kategorie BEV byla ohraničena těmito podmínkami: Hnaná pouze zadní náprava RWD. Maximální točivý moment motorů byl elektromechanicky omezen na hodnotu 300 Nm<sup>24</sup>. Maximální rychlost jízdy vozidla pak omezena na  $150 \text{ km h}^{-1}$ . Výsledky simulace dynamiky jízdy, respektive srovnání vlastností jednotlivých uspořádání hnacích ústrojí, popsaných v oddílu 2.3, jsou zobrazeny v grafickém výstupu ze simulačního prostředí na následujícím obrázku 2.22.



**Obrázek 2.22:** Grafický výstup simulace dynamiky jízdy virtuálního vozidla

<sup>24</sup> Omezení je dáno parametry uvažované převodovky řady 31–03 společnosti BorgWagner.

**Uspořádání a)** využívající SST (na obrázku 2.22 červený trend) je navrženo pro dosažení maximální dynamiky jízdy do rychlosti  $150 \text{ km h}^{-1}$ . Tato rychlost tak zároveň odpovídá maximálním otáčkám jednotky PP125, které jsou  $8000 \text{ ot. min}^{-1}$ . Tomu odpovídá převodový stupeň  $i = 7$ . Virtuální vozidlo v této konfiguraci disponuje zrychlením  $0\text{--}100 \text{ km h}^{-1}$  za  $7,8 \text{ s}$ .

**Uspořádání d)** s bezpřevodovými IWM (na obrázku 2.22 zelený trend) musí pro dosažení dynamiky jízdy odpovídající výše uvedeným variantám disponovat špičkovým točivým momentem alespoň  $2000 \text{ Nm}$  a maximálními otáčkami  $1100 \text{ ot. min}^{-1}$  pro dosažení požadované rychlosti jízdy  $150 \text{ km h}^{-1}$ . Vhodným typem může být hnací ústrojí sestavené z dvojice IWM jednotek ProteanDrive PD18<sup>25</sup> společnosti Protean Electric Ltd. Virtuální vozidlo v této konfiguraci disponuje zrychlením  $0\text{--}100 \text{ km h}^{-1}$  za  $7,2 \text{ s}$ .

**Uspořádání e)** s dvourychlostní DCT (na obrázku 2.22 modrý trend) je koncipováno tak, aby demonstrovalo vliv MST na celkovou dynamiku jízdy vozidla se stejnou pohonnou jednotkou PP125, kterou využívá uspořádání se SST. Z výstupu simulace je zřejmé, že k signifikantnímu zlepšení dynamiky jízdy přispívá MST pouze do rychlosti  $100 \text{ km h}^{-1}$ , tedy v oblasti, kde točivý stroj pracuje v režimu konstantního momentu. Po přechodu do oblasti konstantního výkonu v rozsahu  $100\text{--}150 \text{ km h}^{-1}$ , je nutné přeradit na stejný převodový poměr jako u SST, pro zachování stejné dynamiky. V tomto případě je tak pro jednotku PP125 zvolen převodový poměr  $i_1 = 9,3$ , dotýkající se již limitu adheze<sup>26</sup>. Druhý převodový stupeň  $i_2 = 7$  pak pro dosažení rychlosti  $150 \text{ km h}^{-1}$  při max. otáčkách elektromotoru. Algoritmus řazení je v tomto případě nastaven<sup>27</sup> na řazení při  $7600 \text{ ot. min}^{-1}$ , odpovídajících rychlosti  $105 \text{ km h}^{-1}$ . Doba řazení pro dvouspojkovou automatickou převodovku je stanovena na  $100 \text{ ms}$ <sup>28</sup>. Ústrojí s MST tedy neřeší nejpálčivější problém BEV, kterým je omezená dynamika jízdy při vyšších rychlostech, pouze zlepšuje již tak dobrou dynamiku v nižších rychlostech se zrychlením  $0\text{--}100 \text{ km h}^{-1}$  za  $6,3 \text{ s}$ .

**Uspořádání f)** využívá dva odlišné elektromotory napojené na společnou SST v režimu DMDS (na obrázku 2.22 oranžový trend). Hlavním motorem je virtuální jednotka PMSM-30, která je během jízdy trvale v činnosti. Asistenční motor tvoří ACIM jednotka Siemens 1PV5135-4WS28, která se při nízkém zatížení volně protáčí a pracuje pouze při požadavku na vysokou akceleraci, nebo silné rekuperační brzdění. DMDS využívá stejný převodový stupeň  $i = 7$  jako v uspořádání a), se kterým dosahuje i stejné max. rychlosti jízdy  $150 \text{ km h}^{-1}$ . Virtuální vozidlo v této konfiguraci však disponuje zrychlením  $0\text{--}100 \text{ km h}^{-1}$  za  $7,1 \text{ s}$ .

<sup>25</sup> Virtuální vozidlo standardně disponuje  $19''$  koly, jednotku PD18 lze instalovat od rozměru  $18''$ .

<sup>26</sup> Pro simulaci je zvolen součinitel adheze  $\mu = 0,95$  odpovídající velmi kvalitní suché vozovce. V reálném provozu tak již může být dosažitelné zrychlení v této oblasti omezeno systémem ESP.

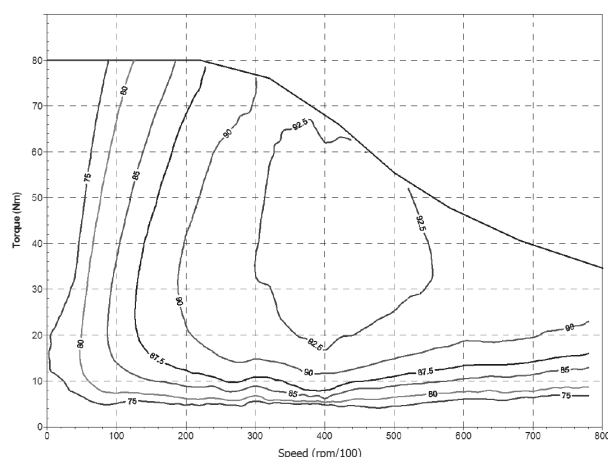
<sup>27</sup> Řazení je tak posunuto mimo oblast povolených rychlostí v provozu na pozemních komunikacích.

<sup>28</sup> U dvourychlostní DCT se řadí vždy na připravený stupeň a nedochází tak k úplného přerušení přenosu hnacího momentu na kola. Uvedená hodnota tento přechodový stav aproximuje pomocí  $50\%$  aktuálně dostupného hnacího momentu.



### 2.3.4 Vliv uspořádání hnacího ústrojí na účinnost pohonu

Pro simulaci účinnosti hnacího ústrojí vozidla dle standardizovaného jízdního cyklu je nezbytná znalost map účinnosti pohonných jednotek a převodovek s diferenciací. Tyto jsou uvedeny na str. 31, respektive str. 49. Pro simulaci ústrojí DMDS, optimalizovaného pro virtuální vozidlo byla vytvořena virtuální jednotka PMSM-30 s mapou účinnosti, vyobrazenou na obr. 2.23. Mapa účinnosti obecného elektropohonu se pro zjednodušení obvykle uvažuje jako konstantní pro celý rozsah provozního napětí trakční baterie, které se dle aktuálního stavu a použité technologie článků mění v rozsahu do  $\pm 20\%$  od jmenovité hodnoty. Další zjednodušení spočívá v uvažované stejné mapě účinnosti pro motorický i generátorický režim pohonu<sup>29</sup>.



Obrázek 2.23: Mapa účinnosti virtuální jednotky PMSM-30 v motorickém režimu

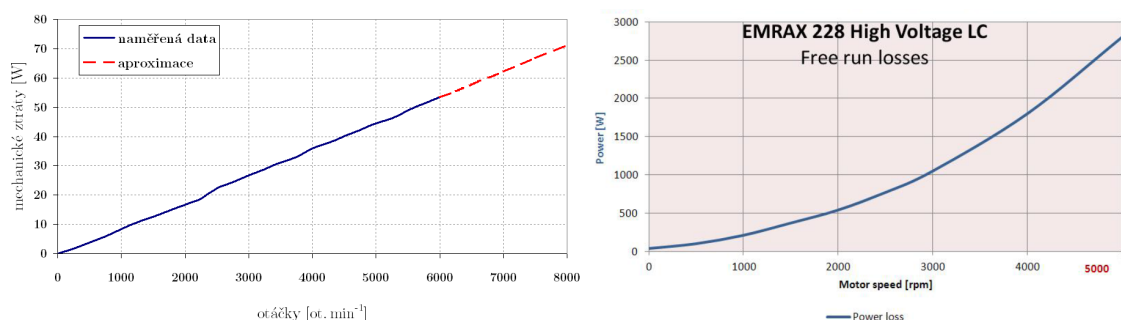
Druhým klíčovým parametrem, vstupujícím do simulace účinnosti DMDS, je závislost mechanických ztrát asistenčního pohonu na otáčkách při jeho volném protáčení. Mezi signifikantní mechanické ztráty točivých strojů patří ztráty v ložiskách a ztráty třením rotoru o vzduch ve vzduchové mezeře stroje<sup>30</sup>, ventilační ztráty<sup>31</sup> a zejména ztráty působené permanentními magnety. Z tohoto důvodu byl pro virtuální vůz zvolen jako asistenční, stroj typu ACIM.

Bohužel tato data nebyla pro vybraný asistenční ACIM stroj Siemens 1PV5135-4WS28 k dispozici, a proto byla nahrazena aproximací vlastním měřením na dynamometru v laboratořích TUL na průmyslovém ACIM s podobnou osovou výškou. Data jsou graficky zobrazena na obr. 2.24. PMSM obecně vykazují signifikantní ztráty při volném protáčení. Nejmenší ztráty obvykle vykazují moderní HSM. Naopak mnohopólové stroje a stroje s axiálním magnetickým tokem (AF-PMSM) jsou pro asistenční pohon DMDS nevhodné. Pro ilustraci jsou přiložena data 100 kW AF-PMSM stroje Emrax 228 společnosti Enstroj d.o.o.

<sup>29</sup> Pokud není k dispozici mapa účinnosti pro generátorický režim, rozdíly v účinnosti u moderních strojů obvykle nejsou signifikantní.

<sup>30</sup> Tento typ ztrát lze, při stále teplotě, považovat za lineárně závislé na otáčkách [61].

<sup>31</sup> Stroje pro BEV jsou obvykle chlazeny kapalinou, takže ztráty ventilátoru stroje nejsou uvažovány.



**Obrázek 2.24:** Ztráty při volném protáčení stroje. *vlevo:* Dvoupólový průmyslový ACIM Siemens, řady 1LA7 s osovou výškou 132 mm s demontovaným ventilátorem. Max. otáčky tohoto stroje jsou  $6000 \text{ ot. min}^{-1}$ , dále je trend aproximován. *vpravo:* AF-PMSM stroj Emrax 228 [62]

Všechny parametry pak vstupují do simulace spotřeby elektrické energie vozidla dle standardizovaného jízdního cyklu. Prostředí pak pro každé hnací ústrojí automaticky vykreslí čtveřici grafů, které jsou uvedeny na str. 53, 54. Dále vypočítá střední hodnotu účinnosti dle zadaného cyklu, které jsou uvedeny v následující tabulce 2.4.

**Tabulka 2.4:** Přehled výsledků simulace účinnosti vybraných hnacích ústrojí

jednotka	hnací ústrojí		jízdní cyklus			
	koncepce	přev. poměr	ECE 15	EUDC	NEDC	FTP 75
	[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]
UQM Tech. PP125	SST	7	69	77	73	64
Siemens 1PV5135	SST	7	59	72	66	-
ProtenElectric 2×PD18	IWM <sup>a</sup>	-	54	73	63	-
UQM Tech. PP125	DCT <sup>b</sup>	3(7)	75	85	80	-
PMSM-30 @ 1PV5135	DMDS <sup>c</sup>	7	80	89	84	-

<sup>a</sup> Hnací síla je rozdělena rovnoměrně mezi obě jednotky instalované na zadní nápravě

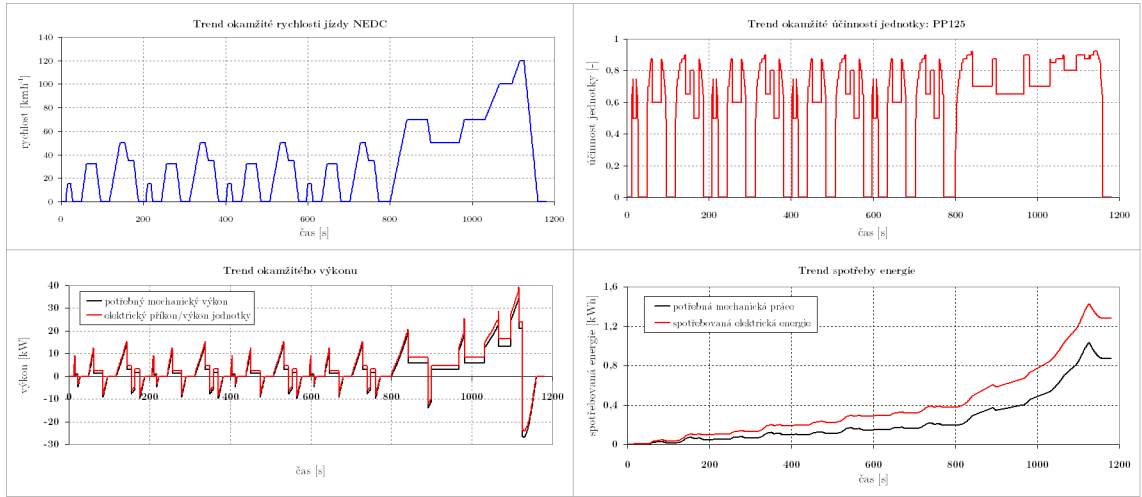
<sup>b</sup> DCT je zde navržena pro maximální účinnost. První převodový stupeň  $i_1 = 7$  je řazen pouze při akceleraci, druhý převodový stupeň  $i_2 = 3$  je zařazen pro jízdu konst. rychlostí pro optimální využití mapy účinnosti jednotky PP125 viz obr. 2.29 a 2.31 *vpravo dole*

<sup>c</sup> DMDS zde využívá společnou SST se dvěma přírubami. DMDS je nastaven tak, aby hlavní stroj PMSM-30 pracoval trvale a pouze po překročení jeho momentové charakteristiky byl aktivován asistenční stroj 1PV5135-4WS28. Vliv ztrát volným protáčením asistenčního motoru 1PV5135-4WS28 na celkovou účinnost soustrojí viz obr. 2.24 je zanedbatelný

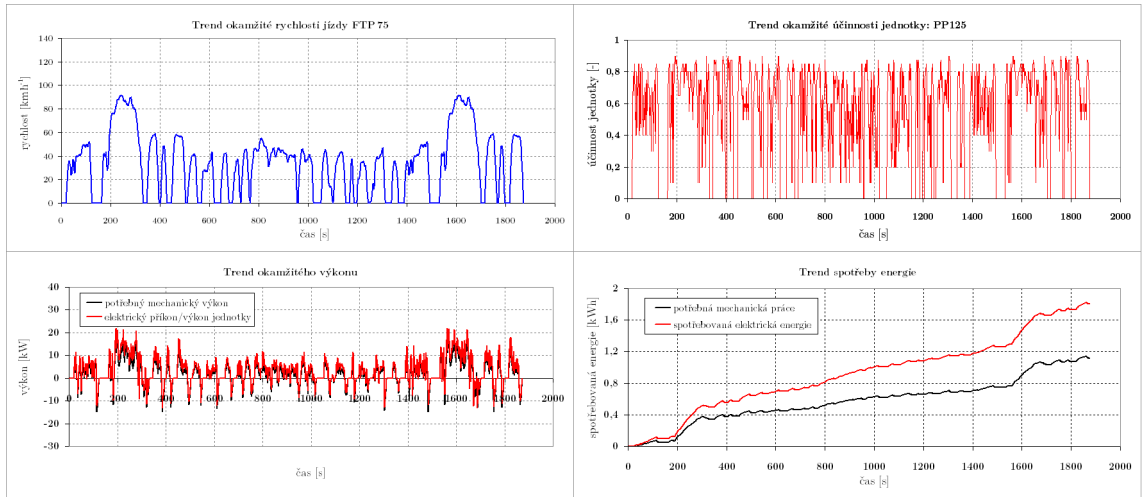
Legenda pro grafický výstup simulace na obr. 2.25 až 2.30 na následujících stranách. *vlevo nahoře:* Rychlost jízdy dle daného jízdního cyklu. *vlevo dole:* Potřebný mechanický výkon na hřídeli točivého stroje<sup>32</sup> spolu s elektrickým příkonem/výkonem jednotky točivého stroje v režimu motor/generátor. *vpravo nahoře:* Elektrická účinnost dané jednotky motor+měníč. *vpravo dole:* Trend potřebného množství mechanické práce i elektrické energie.

<sup>32</sup> V tomto trendu je zapracována účinnost převodového ústrojí, u IWM jde přímo o výkon na kolech.

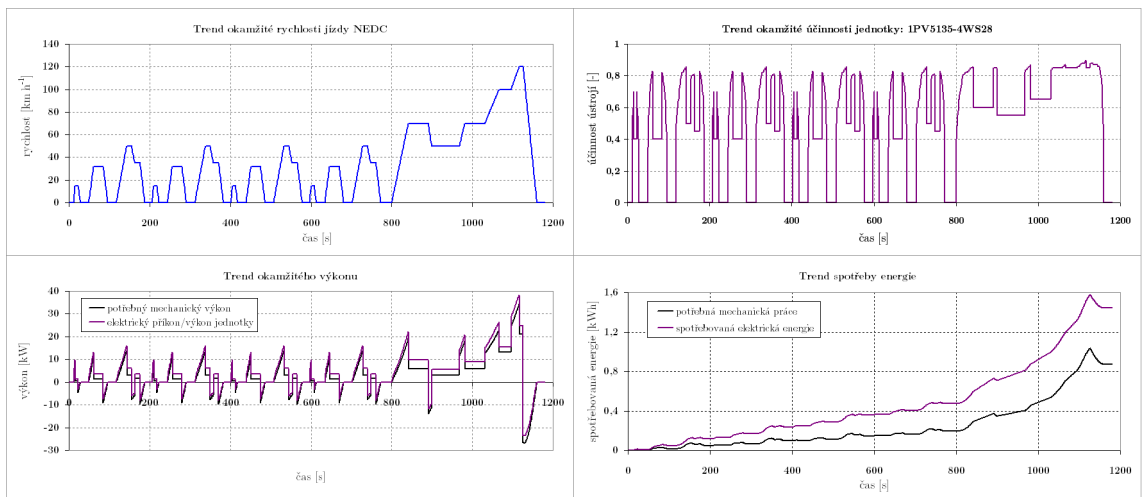




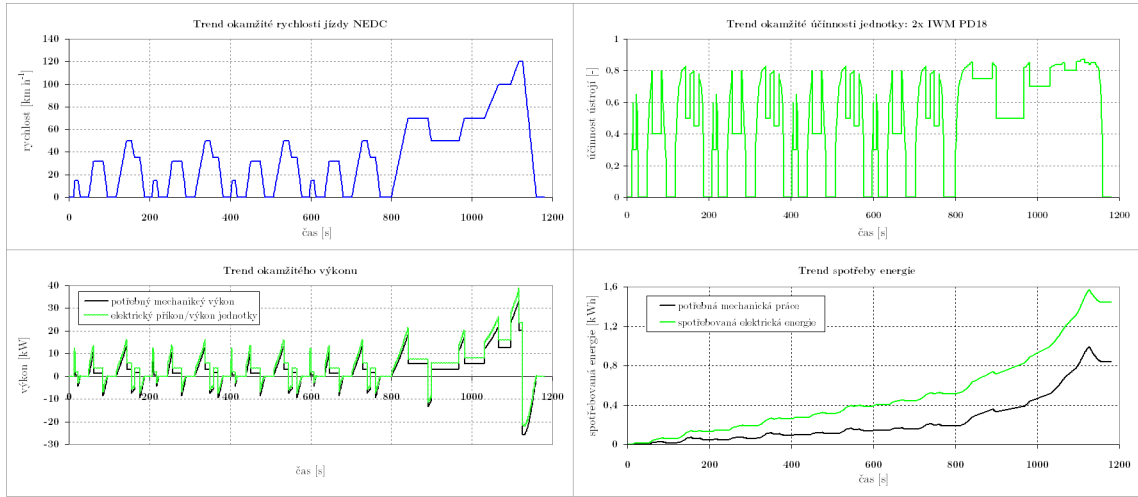
Obrázek 2.25: Simulace ústrojí: PP125 + SST ( $i_c = 7$ ) dle NEDC



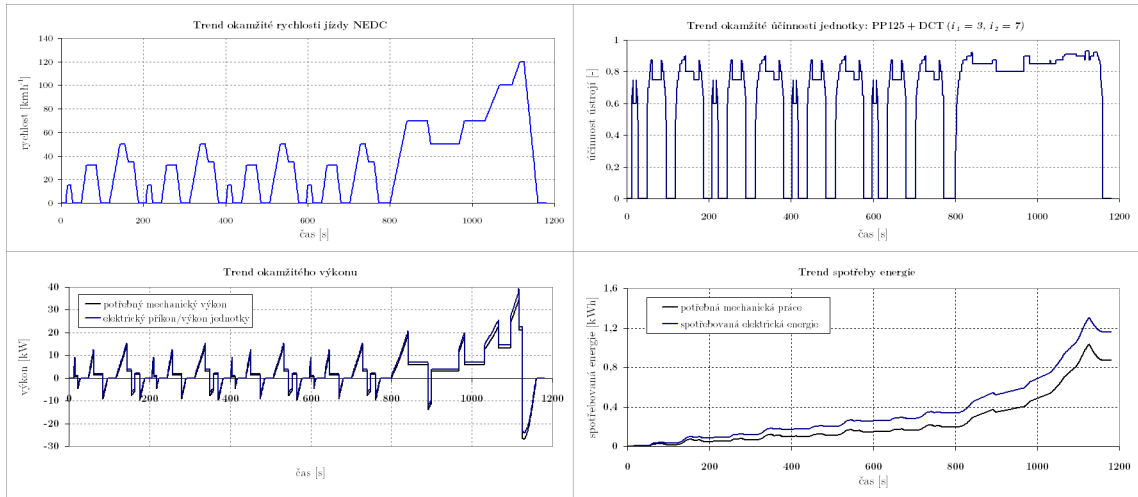
Obrázek 2.26: Simulace ústrojí: PP125 + SST ( $i_c = 7$ ) dle FTP 75



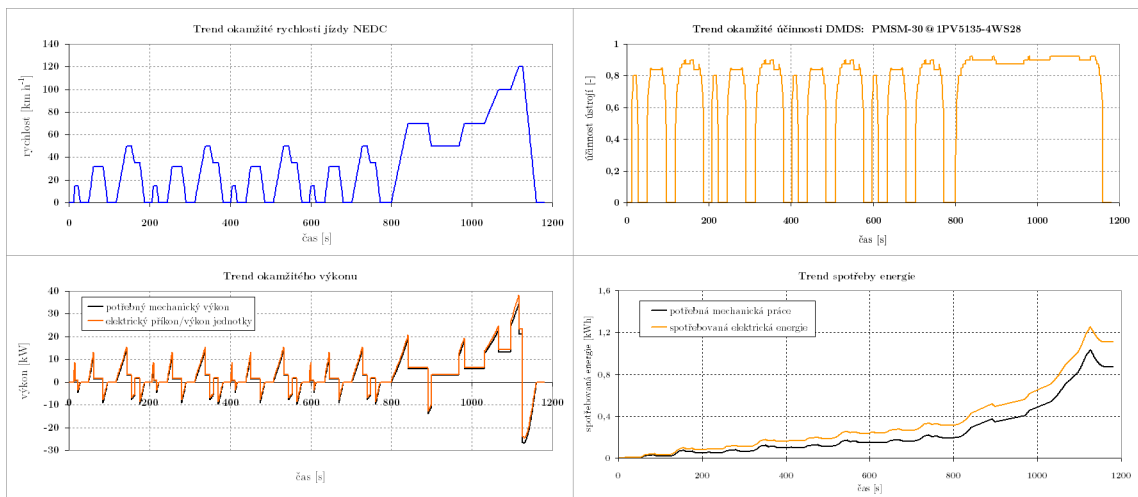
Obrázek 2.27: Simulace ústrojí: 1PV5135-4WS28 + SST ( $i_c = 7$ ) dle NEDC



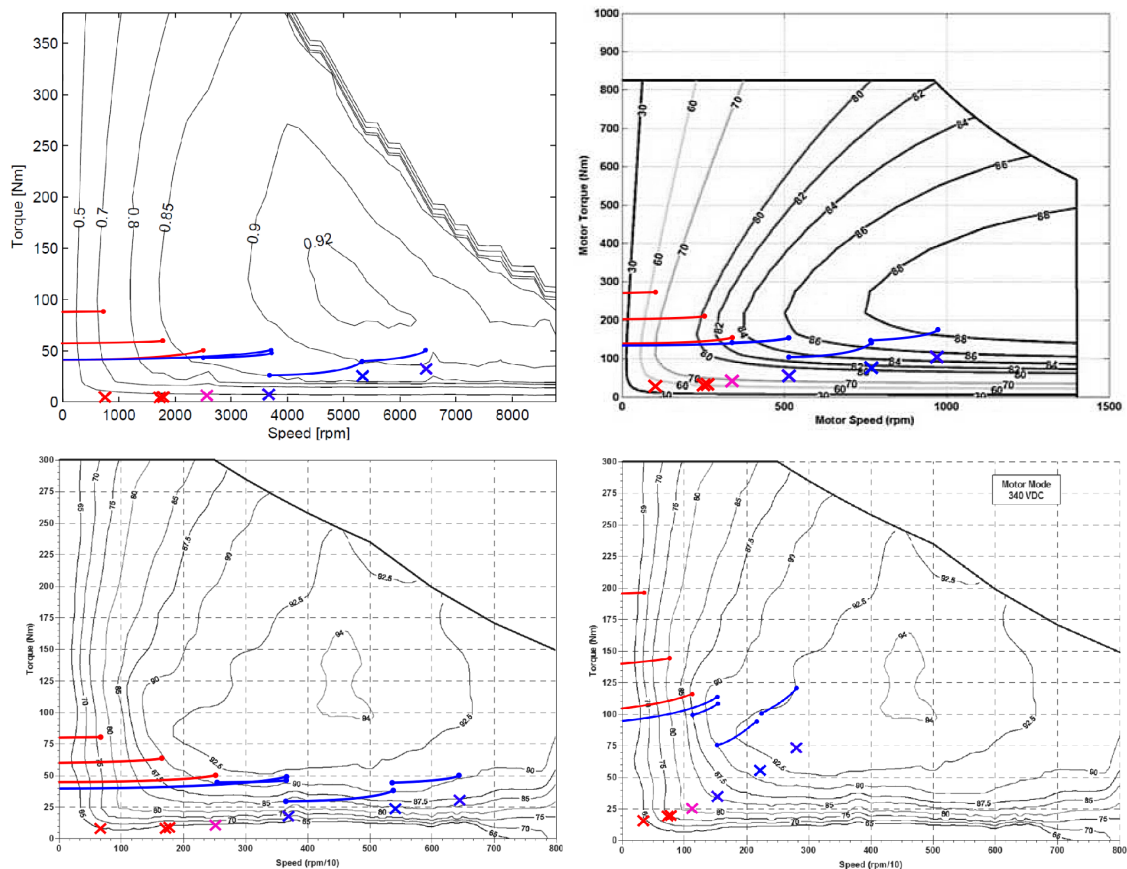
**Obrázek 2.28:** Simulace ústrojí: 2×PD18 IWM (bez převodů) dle NEDC



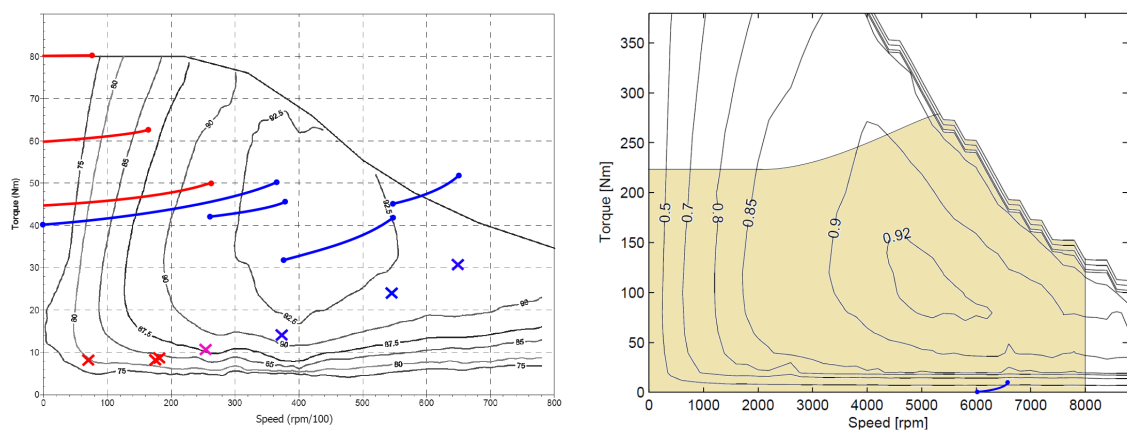
**Obrázek 2.29:** Simulace ústrojí: PP125 + DCT ( $i_1 = 7, i_2 = 3$ ) dle NEDC



**Obrázek 2.30:** Simulace DMDS: PMSM-30 @ 1PV5135 ( $i_c = 7$ ) dle NEDC



**Obrázek 2.31:** Mapy účinnosti hnacího ústrojí zatížené dle NEDC. *legenda:* Červená značí část ECE 15, modrá EUDC. Křížky značí zatížení při konst. rychlosti, spojitě čáry zatížení při akceleraci. *vlevo nahoře:* 1PV5135+SST ( $i_c = 7$ ) *vlevo dole:* PP125+SST ( $i_c = 7$ ), zároveň odpovídá prvnímu stupni DCT. *vpravo nahoře:* 2×PD18 IWM (bez převodů) *vpravo dole:* PP125+DCT ( $i_c = 3$ ), odpovídá zařazenému druhému stupni DCT



**Obrázek 2.32:** Mapy účinnosti hnacího ústrojí DMDS se společnou SST ( $i_c = 7$ ) dle NEDC. *vlevo:* PMSM-30 *vpravo:* 1PV5135, barevná oblast odpovídá omezením dynamiky jízdy deklarovaných na str. 49

### 2.3.5 Konfrontace výsledků simulace s reálnými daty

**Tabulka 2.5:** Simulace vlivu vybraných hnacích ústrojí na spotřebu dle NEDC

jednotka	hnací ústrojí		jízdní cyklus NEDC			
	koncepce	přev. poměr	W s	W bez	$\Delta W$	$\Delta W$
			regen. [kWh/100 km]	regen. [kWh/100 km]	regen. [%]	ideál. p. [%]
ideální pohon <sup>a</sup>	-	-	7,9	11,4	30,3	0
Siemens 1PV5135	SST	7	13,1	15,8	17,0	-39,4
ProtenElectric 2×PD18	IWM	-	13,0	15,5	15,5	-39,4
UQM Tech. PP125	SST	7	11,6	14,5	19,6	-31,9
UQM Tech. PP125	DCT	3(7)	10,5	13,4	21,4	-24,8
PMSM-30 @ 1PV5135	DMDS <sup>c</sup>	7	10,0	13,0	22,6	-21,0
BMW HSM-125	SST	9,7	12,9 <sup>d</sup>	-	-	-38,8

<sup>a</sup> Ideální hnací ústrojí bez převodů a mechanických i elektrických ztrát

<sup>d</sup> Celková spotřeba vozidla vč. palubních spotřebičů, měřená na terminálech trakční baterie

V tabulce 2.5 se udává spotřeba vozidla v kWh na ujetí 100 km dle jízdního cyklu NEDC. Zde je vyjádřen i vliv rekuperace, kde v ideálním případě lze získat zpět až 30 % dodané energie. Data jsou konfrontována s ideálním pohonem a údaji výrobce o spotřebě reálného vozidla BMW i3. Avšak vzájemné srovnání účinnosti hnacích ústrojí s daty spotřeby energie vozu i3 v tabulce 2.5 by zde bylo zavádějící.

Naměřenou spotřebu vozu obecně významně ovlivňuje i trvalý odběr palubních spotřebičů a účinnost trakční baterie, zejména při ukládání rekuperované energie. Pro možnost vzájemného porovnání je dosazen trvalý příkon spotřebičů 380 W. Tato hodnota vychází z provedené studie problematiky [103]. Simulace kalkuluje se střední hodnotou účinnosti trakční baterie 90 %. Výsledky jsou uvedeny v tab. 2.6.

**Tabulka 2.6:** Simulace spotřeby vozidla s vybraným hnacím ústrojí dle NEDC

jednotka	hnací ústrojí		NEDC + palubní spotřebiče <sup>a</sup>			
	koncepce	přev. poměr	W s	W bez	$\Delta W$	$\Delta W$
			regen. [kWh/100 km]	regen. [kWh/100 km]	regen. [%]	ideál. p. [%]
ideální pohon	-	-	7,9	11,4	30,3	0
Siemens 1PV5135	SST	7	16,3	18,4	11,8	-51,5
ProtenElectric 2×PD18	IWM	-	16,2	18,1	10,6	-51,2
UQM Tech. PP125	SST	7	14,7	17,0	13,8	-46,3
UQM Tech. PP125	DCT	3(7)	13,4	15,8	15	-41,0
PMSM-30 @ 1PV5135	DMDS	7	12,9	15,4	15,8	-38,8
BMW HSM-125	SST	9,7	12,9	-	-	-38,8

<sup>a</sup> Denní osvětlení, posilovač řízení a brzd, infotainment, relé, ztráty v DC-DC měniči a vedení...

## 2.4 Zhodnocení výsledků

V této kapitole byly představeny vlastnosti vybraných koncepcí hnacích ústrojí pro elektrická vozidla. Pro simulační ověření byly zvoleny ty, které nejlépe vyhovují požadavku na vysokou dynamiku jízdy silničních vozidel kategorie M1 při zachování celkové vysoké účinnosti. Jako referenční model vozidla bylo vybráno BMW i3.

Simulace využívající dat reálných jednotek trakčních pohonů potvrzují, že volba koncepce hnacího ústrojí má zásadní vliv na celkovou efektivitu hnacího ústrojí. Dle očekávání, nejhoršího výsledku dosahují výkonné ACIM stroje s SST, a to díky své poměrně úzké oblasti vysoké účinnosti. V této konfiguraci ale dosahují velmi špatných účinností i IWM motory, kterým nepomáhá ani výhoda v podobě absence ztrát mechanických převodů<sup>33</sup>. Mnohopólové PMSM s rotačním pláštěm, primárně využívané pro IWM, principiálně disponují nízkou účinností při malém zatížení. Problematický u těchto strojů je také obecně vysoký „cogging torque“<sup>34</sup>, který dále navyšuje ztráty, zejména pak při volném protáčení stroje.

Lze tedy vyslovit první obecný závěr (platný zejména pro vozidla kategorie M1):

- *Pokud je výkon všech současně pracujících točivých strojů vozidla, potřebný pro jízdu konstantní rychlostí  $90 \text{ km h}^{-1}$  nižší než  $1/10$  jejich celkového výkonu, pak bude hnací ústrojí s SST a IWM vždy pracovat v oblasti nízké účinnosti daného točivého stroje, bez ohledu na jeho princip.*

Z hlediska účinnosti tak největšího přínosu dosahují uspořádání DMDS a MST. Ze srovnání spotřeby vozu v tabulce 2.6 vyplývá, že zejména navržené ústrojí DMDS dosahuje totožné spotřeby jako původní ústrojí vozu BMW i3, využívající SST se strojem HSM-125, který je jedním z nejpropracovanějších trakčních elektromotorů současnosti. Přitom virtuální stroj PMSM-30, použitý jako hlavní stroj DMDS, disponuje dnes již spíše podprůměrnou účinností.

Lze tak vyslovit druhý obecný závěr:

- *Hnací ústrojí DMDS může poskytnout srovnatelné parametry celkové účinnosti v kombinaci s lepší trakční charakteristikou hnacího ústrojí při použití méně pokročilých a tedy i levnějších točivých strojů. Pokud je zde navíc požadavek na provedení 4WD, představuje koncepce hnacího ústrojí DMDS optimální řešení.*

<sup>33</sup> V laboratoři na válcové brzdě se neprojeví ani potenciální výhoda nižších ztrát elektronického diferenciálu. Průjezd zatáčkami není v NEDC simulován.

<sup>34</sup> Cogging torque, do češtiny překládaný jako „západkový efekt“, je způsobený interakcí mezi PM rotorem a statorovými sloty. Lze jej částečně omezit optimalizací návrhu a kvalitou výroby stroje.

## 3 Experimentální elektromobil TUL

### 3.1 Požadavky kladené na vozidlo

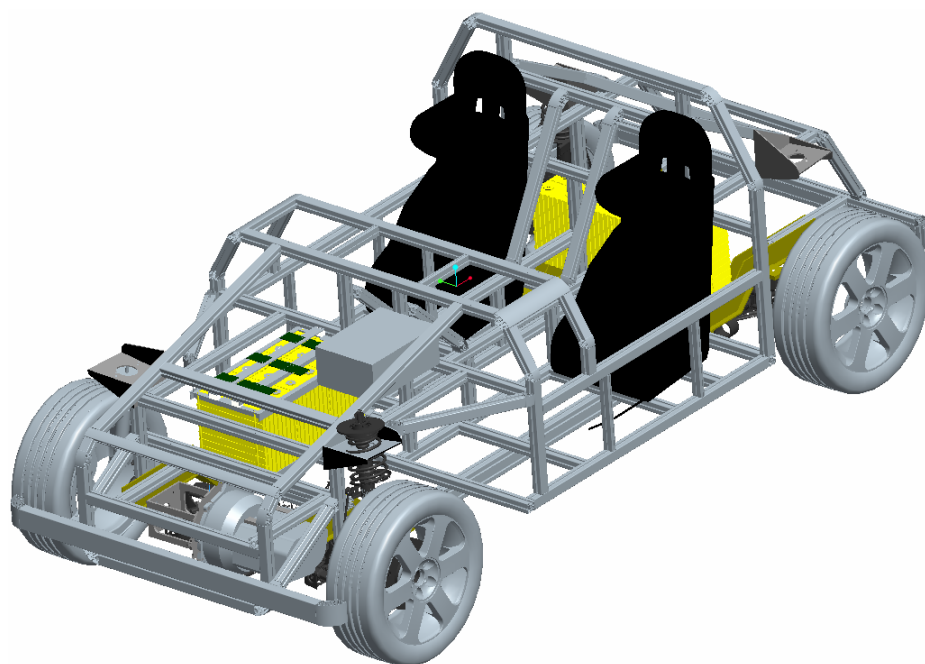
V roce 2011 zahájil Ústav mechatroniky a technické informatiky (MTI) spolupráci s Katedrou vozidel a motorů (KVM) s cílem rozšířit kompetence obou subjektů v oblasti elektromobility, neboť Technická univerzita v Liberci již zaznamenává zvýšenou poptávku po vysoce kvalifikovaných odbornících v daném oboru. Ještě v roce 2011 byl mnou a kolegou Ing. Martinem Bukvicem z KVM vypracován projekt na vývoj lehkého vozidla kategorie BEV. Tento vůz měl vytvořit otevřenou platformu pro testování stávajících i aktuálně vyvíjených komponent určených pro elektrická vozidla. Mým přínosem projektu byl návrh a realizace elektrického hnacího ústrojí, včetně simulace vlivu na dynamiku jízdy a spotřebu vozidla. Dále pak návrh trakční baterie a jejího managementu spolu s ostatní palubní elektronikou.

### 3.2 První generace vozidla

První generaci vozidla jsem s kolegou realizoval v letech 2012–2013. Konceptně se jedná o dvoumístné dvoustopé vozidlo karoserie typu Roadster s pevným rámem a přední hnanou nápravou viz obrázek 3.1. Konstrukce rámu je smíšená, s převládajícím nasazením dílů ze stavebnicového systému extrudovaných hliníkových profilů. Ocelové díly byly použity pouze na zvláště namáhaných místech konstrukce. Z tohoto důvodu dostalo vozidlo pracovní název eŠus. V původním projektu se s konkrétním řešením kapotáže vozidla nepočítalo, nicméně modulární konstrukce rámu budoucí kapotáž umožňuje. Podvozek vozidla rozměrově vychází z vozu Škoda Fabia II. generace. Rozvor náprav je 2462 mm. Rozchod obou náprav je totožných 1435 mm, kvůli specifickému použití dvojice předních náprav z vozu Fabia se zavěšením typu McPherson. Toto řešení otevírá možnost pro budoucí instalaci systému přiřizování zadní nápravy. Ve stávající verzi je řízení zadní nápravy mechanicky zablokováno. Výška vozidla je 1300 mm a délka 3350 mm. Pohotovostní hmotnost vozidla vč. baterie je cca 550 kg. Parametry vozidla byly projektovány tak, aby odpovídaly vybrané kategorii vozidla dle směrnic EHS. Konkrétně pak skupině L7e<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Dle Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/24/ES jde o ostatní čtyřkolky, jejichž hmotnost v nenaloženém stavu nepřekračuje 400 kg (kategorie L7e), do níž se nezapočítává hmotnost baterií v případě elektrických vozidel, a u nichž maximální netto výkon motoru nepřekračuje 15 kW.





Obrázek 3.1: Počítačový model rámu experimentálního elektromobilu TUL

### 3.2.1 Popis hnacího ústrojí

Elektrickou výzbroj první generace vozidla tvořil elektromotor Freeair, typ HCS C 40000/2 I Industry. Jednalo se o vzduchem chlazený BLDC stroj s rotačním pláštěm. Motor je vybaven Hallovými senzory polohy rotoru a teplotním snímačem. Jako elektronický regulátor otáček byl použit univerzální měnič HBC 50063 od společnosti MGM COMPRO. V elektromobilu se počítalo s napájením motoru z trakční baterie s nominálním napětím 55 V<sup>2</sup>. Vzhledem k napěťové konstantě stroje 72 ot. min<sup>-1</sup> V<sup>-1</sup> bylo hnací ústrojí zkonstruováno s využitím šestistupňové manuální převodovky VW řady MQ 200 pro vylepšení dynamiky jízdy vozidla. V této sestavě motor točí naprázdno 4000 ot. min<sup>-1</sup> při jmenovitém napětí 55 V.

Volbu tohoto konkrétního typu stroje ovlivnily špičkové katalogové údaje setu motor+měnič, který vážil 10 kg a tak měl disponovat měrným výkonem až 4 kW kg<sup>-1</sup>. Bohužel dodaný motor byl schopen trvale dodávat pouze 4 kW<sup>3</sup>. Nejvyšší dosažitelný výkon stroje byl cca 15 kW, při poklesu otáček na 2400 ot. min<sup>-1</sup>, přičemž došlo k dosažení max. povolené teploty vinutí. Bez proudového omezení měniče tak během jízd opakovaně docházelo k teplotnímu omezení výkonu. Největší potíže však působil vlastní měnič, kdy ani po třetí úpravě u výrobce nebyl schopen opakovaně dosahovat svých jmenovitých parametrů<sup>4</sup> bez nevratného poškození. Prakticky tak nebylo možné naměřit úplnou momentovou charakteristiku stroje viz příloha A. Tato konkrétní sestava se tak pro pohon vozidla neosvědčila.

<sup>2</sup> Vztah k mezní hodnotě 60 VDC bezpečného malého napětí živých částí s nimiž může osoba přijít do styku, platící pro prostory normální i nebezpečné dle normy ČSN EN 33 2000-4-41 ed. 2:2007.

<sup>3</sup> Naměřená oteplovací konstanta 420 s, při ustálené teplotě vinutí 130 °C, nucené chlazení vzduchem.

<sup>4</sup> Výrobce měniče deklaroval vstupní proud z baterie 500 A trvale, 750 A špičkově po dobu 10 s.

**Tabulka 3.1:** Katalogové parametry elektromotoru HCS C 40000/2 I

parametr	hodnota
provozní napětí	50–100 V
max. otáčky	8000 ot. min <sup>-1</sup>
max. účinnost	92 %
max. moment	70 Nm
max. výkon	40 kW
trvalý výkon	15–20 kW
proud naprázdno	14 A <sup>a</sup>
odpor vinutí $R_s$	5 mΩ
max. pracovní teplota	130 °C
rozměry	d: 109 mm l: 105 mm
hmotnost	8 kg

<sup>a</sup> při napájení 55 V

### 3.2.2 Popis trakční baterie

Vlastní výběr elektrochemických článků pro první generaci vozidla měl hned několik specifických požadavků. Články musely být schopné pracovat bez teplotního managementu, disponovat inherentní bezpečností proti vzplanutí a výbuchu<sup>5</sup> a také možností spojování článků do baterie bez použití svařování. Těmto požadavkům v roce 2011 nejlépe vyhovovaly LFP články od čínského konsorcia Winston Battery Ltd., které navíc v té době již disponovaly dobrou dostupností od českého dovozce. Toto rozhodnutí jsme učinili i s vědomím toho, že technologie LFP obecně, a zejména pak toto konkrétní provedení, není perspektivní pro použití v moderních BEV.

Základ trakční baterie tak tvořilo zapojení 16(17)s<sup>6</sup> velkých 200 Ah prizmatických článků WB-LYP200AHA(Tall). Kladná elektroda článku je tvořena aktivním materiálem na bázi LiFe(Y)PO<sub>4</sub><sup>7</sup> a záporná elektroda je uhlíková. Proudové kolektory tvoří hliník pro kladnou elektrodu a Cu pro zápornou. Vlastní článek je uložen v pevném plastovém obalu s povrchovým žebrováním, které tvoří ventilační kanálky a především omezuje styčnou plochu článků pro přenos tepla při jejich skládání do kompaktní baterie. Terminály článku se závitem M8 nejsou chráněny žádnou povrchovou úpravou. Mezi terminály je umístěn pojistný tlakový ventil.

Nominální napětí článku je 3,2 V. Provozní rozsah napětí pak 2,7–3,7 V. Hmotnost článku je 8 kg, předpokládaná životnost 2000 cyklů při 80 % DoD. Maximální využitelná energie baterie 10,8 kWh při 17s, odpovídá dojezdu 120 km dle NEDC.

<sup>5</sup> Hodnoceno dle metodiky IEC 62133 2, UL 1642 nebo EUCAR.

<sup>6</sup> Výrobce měniče HBC 50063 deklaroval možnost provozu se 17s LFP článků, odpovídající provoznímu napětí 63 V. Trakční baterie tak byla navržena pro fyzické osazení 17 článků s tím, že pro vyhovění ČSN EN 33 2000-4-41 lze jeden článek vypustit.

<sup>7</sup> Dopování výchozího práškového materiálu LiFePO<sub>4</sub> yttriem způsobí v krystalech materiálu částečné nahrazení částic Fe a následně i výhodnější uspořádání krystalové struktury. Praktickým přínosem je zejména zlepšení cyklické životnosti [63].



Sestava trakční baterie je ve voze rozdělena do dvou bloků po 8s a 9s článcích, umístěných v blízkosti náprav. Motivem této koncepce bylo ponechat sestavu trakční baterie dobře přístupnou pro testování a výhodné rozložení hmotnosti vozidla. Vlastní bloky tvoří vždy rám svařený z ocelových profilů s montáží systému chlazení balancerů BMS. Oba bloky lze velmi snadno z vozidla demontovat. Připojovací vodiče tvoří pryžové kabely typu H01N2-D s průřezem 70 mm<sup>2</sup>, které jsou ukončeny lisovacími Cu kabelovými oky s dírou pro šroub M8. Stejný průřez mají i lakované Cu spojky článků. Kompletní sestava trakční baterie pak váží 150 kg.

- **Systém BMS** vozidla je koncipován jako hybridní<sup>8</sup>. Hlavní část funkcí BMS je integrována přímo v měniči HBC 50063. Měnič v základní sestavě snímá pouze celkové napětí a proud baterie, ze kterých je ale schopen vypočítat a vysílat<sup>9</sup> stav nabití baterie dalším jednotkám. Díky externímu modulu dokáže také snímat jednotlivá napětí až 17s článků. Měnič disponuje i dvěma externími vstupy pro teplotní sondy KTY-81. Tyto byly využity pro sledování teploty vybraných článků v obou blocích baterie. Měnič je tak schopen na základě softwarově nastavitelných mezí, pro všechny měřené veličiny, ovládat jak hlavní výkonové relé odpojující trakční baterii, tak i relé odpojující nabíječku. Měnič je vybaven i integrovaným dataloggerem, který při vzorkování 100 ms ukládá všechny sledované parametry po dobu 12 min. S externím paměťovým modulem, vybaveným microSD kartou, pak v podstatě po neomezeně dlouhou dobu. Měnič nedisponuje funkcí balanceru.

Z tohoto důvodu mnou vyvinutá elektronika vozu řeší i decentralizované balancování článků, kde každý článek má svůj balancer. Ty vycházejí z principu nastavitelné napěťové reference, ovládající otevírání výkonových PNP tranzistorů. Jedná se tak o metodu pasivního balancování<sup>10</sup>. Balancery jsou uloženy v hliníkových profilech uchycených k držáku baterie. Profily i balancery umožňují pasivně vyzářit trvalý balancující proud 2 A. Každý balancer je připojen na společnou sběrnici a vybaven adresováním pro signalizaci započetí balancování řídicí jednotce vozidla (VCU). VCU sleduje a ovládá všechna elektrická zařízení ve vozidle, s měničem komunikuje po sběrnici CAN. Kompletní schéma elektroniky s popisem je v příloze B.

- **Systém dobíjení** vozidla neobsahuje zabudovanou palubní nabíječku. Pro nabíjení slouží kompaktní přenosná nabíječka, typ POW48V30A o výkonu 1800 W/30 A. Doba nabíjení zcela vybité baterie vozidla je 8 h. Vlastní nabíječ je napájen jednofázově ze sítě 230VAC a vybaven obvody pro komunikaci se systémem BMS či VCU, který umožňuje snížit nabíjecí proud na 2 A pro balancování článků ve finální fázi nabíjení. K dispozici je i stacionární rychlodobíjecí stanice s maximálním nabíjecím výkonem 9,8 kW/150 A, která zkrátí čas k plnému nabití na 3 h.

<sup>8</sup> V tomto kontextu se rozumí hybrid mezi centralizovaným řešením BMS, kde všechny součásti elektronického managementu jsou uloženy v centrální jednotce a decentralizovaným, kde každý článek, respektive modul má svoji vlastní jednotku, schopnou samostatné činnosti.

<sup>9</sup> Měnič HBC 50063 v naší konfiguraci disponoval sběrnici CAN.

<sup>10</sup> Aktivní metoda balancování, tedy přelévání energie z nejslabšího článku do okolních, se pro baterie BEV nepoužívá. Díky velmi těsné výrobní toleranci moderních článků běžně postačuje balancující proud odpovídající méně než tisícině kapacity článku. Tedy množství zmařené energie pro vyrovnaní kapacity článků je zanedbatelné a problém nečiní ani chlazení balanceru.



Obrázek 3.2: Funkční vzorek elektromobilu TUL, představený na MSV Brno 2013

### 3.3 Druhá generace vozidla

Její realizace započala v roce 2014 a v současné době probíhá osazování a testování jednotlivých komponentů v laboratořích TUL.

#### 3.3.1 Změny proti první generaci

Koncept druhé generace (Gen2) vychází z první generace, kterou doplňuje o trendy moderních BEV. Nejvýznamnější změnou konstrukce vozidla je návrh a realizace nového samonosného rámu, který tvoří v celém prostoru mezi nápravami šachtu bez příčných nosníků, určenou pro instalaci trakční baterie<sup>11</sup>. Tato koncepce se jeví jako nezbytná pro maximalizaci dojezdu současných BEV při zachování veškerého prostorového komfortu<sup>12</sup>. Samonosná karoserie, dotažená téměř k dokonalosti u moderních modulárních platforem, není principiálně schopna v podvozkové části vozidla vyhradit takový instalační prostor, z důvodu udržení své integrální pevnosti a tuhosti. Tento prostor bude zároveň vždy nevýhodně tvarován. Nevýhodou podvozkové karoserie u BEV je, že navyšuje hmotnost oproti koncepci se samonosnou karoserií asi o 10 % a zároveň ovlivňuje ergonomii interiéru vozidla díky nutnosti vyššího usazení posádky<sup>13</sup>. Vozidlo také dostalo novou kapotáž pro zlepšení aerodynamiky.

<sup>11</sup> Vlastní krabice trakční baterie běžně tvoří prvek zvyšující integrální tuhost vozidla.

<sup>12</sup> Trakční baterie ve voze neblokuje zavazadlový prostor, či prostor pro osádku.

<sup>13</sup> Automobilky Tesla a BMW řeší problematiku hmotnosti podvozkové karoserie použitím slitin Al. Vyšší usazení ve vozidle je dáno minimální konstrukční výškou baterie 10 cm u vozu Tesla Model S a cca 14 cm u vozu BMW i3. U vozidlo eSUS Gen2 je konstrukční výška baterie 84 mm.

### 3.3.2 Prototyp hnacího ústrojí Dual Motor Drive System

Vzhledem k výsledkům simulací jednotlivých koncepcí hnacích ústrojí jsem se rozhodl ve druhé generaci experimentálního elektromobilu TUL ověřit praktické vlastnosti ústrojí typu DMDS. K tomuto účelu bylo třeba dodefinovat požadavky na dynamiku jízdy a následně navrhnout vhodné trakční elektromotory, měniče a převodovku.

- **Požadavky na dynamiku jízdy**

Z teoretického rozboru v kapitole 2. vyplývá, že ústrojí typu DMDS nebo DCT přináší zlepšení celkové účinnosti oproti hnacímu ústrojí s SST pouze za předpokladu požadavku na vysokou jízdní dynamiku vozidla. Proto bylo hnací ústrojí vozidla Gen2 koncipováno pro dosažení maximální rychlosti až  $150 \text{ km h}^{-1}$  a požadovaného zrychlení  $0\text{--}100 \text{ km h}^{-1}$  pod 10 s. Vzhledem k očekávanému navýšení pohotovostní hmotnosti vozidla na 725 kg vychází pro splnění požadavků dynamiky jízdy špičkový<sup>14</sup> mechanický výkon soustrojí  $>70 \text{ kW}$ .

### 3.3.3 Návrh trakčních elektromotorů a měničů

Pro optimalizaci koncepce DMDS na maximální účinnost je třeba výkon obou strojů diferencovat obvykle v poměru 1:2 až 1:3. Hlavní stroj by měl být schopen trvale pracovat při jízdě v celém rozsahu konstantních rychlostí<sup>15</sup> a přitom vykazovat účinnost vyšší než 80 %. Pro moderní BEV kategorie M1 to odpovídá trvalému výkonu 25–30 kW. Pro vozidlo Gen2 byl požadavek trvalého výkonu snížen na hodnotu 10 kW<sup>16</sup>, avšak s možností krátkodobého přetížení na 20 kW. To zároveň implikuje požadavek na kapalinové chlazení hlavního stroje DMDS. Asistenční motor tak musí disponovat špičkovým výkonem min. 50 kW. U tohoto stroje není chlazení kapalinou nezbytné vzhledem k předpokládanému režimu zatížení. Jako hlavní stroj byl zvolen AF-PMSM kapalinou chlazený stroj ME1302 americké společnosti Motenergy, Inc., jako asistenční pak ACIM stroj AC-20 americké společnosti HPEVS.



**Obrázek 3.3:** *vlevo:* AF-PMSM stroj ME1302 [64] *vpravo:* ACIM stroj AC-20 [65]

<sup>14</sup> Špičkový výkon se požaduje min. po celou dobu akcelerace  $0\text{--}100 \text{ km h}^{-1}$ , pro Gen2 je to 10 s.

<sup>15</sup> Dle NEDC do  $120 \text{ km h}^{-1}$ .

<sup>16</sup> Hodnota odpovídá konst. rychlosti  $90 \text{ km h}^{-1}$ . Omezení vychází z jízdních vlastností vozidla Gen2.

Hlavním požadavkem na parametry trakčních měničů DMDS byla implementace vektorového řízení momentu točivého stroje. Měniče s požadovaným výkonem a vlastnostmi nabízí společnosti Sevcon Ltd. a Curtis Instruments, Inc. Zvolil jsem měniče Sevcon Gen4 díky referencím z použití v automobilním průmyslu<sup>17</sup> a zastoupení této společnosti v ČR<sup>18</sup>. Měniče disponují sběrnici CAN a jsou vybaveny rozhraním pro sin-cos snímače otáček, které využívají oba zvolené točivé stroje.

**Tabulka 3.2:** Katalogové parametry elektromotorů prototypu DMDS

parametr stroje:	ME1302	AC-20
princip stroje	AF-PMSM	ACIM
provozní napětí <sup>a</sup>	48–120 V	48–144 V
max. otáčky	8000 ot. min <sup>-1</sup>	8000 ot. min <sup>-1</sup>
max. účinnost <sup>b</sup>	92 %	88 %
max. moment <sup>c</sup>	65 Nm	111 Nm
max. výkon	25 kW	55 kW
trvalý výkon <sup>d</sup>	10 kW	2 kW
max. pracovní teplota	130 °C	130 °C
hmotnost	16,9 kg	27,2 kg

<sup>a</sup> DMDS bude napájeno z trakční baterie o jmenovitém napětí 108 V

<sup>b</sup> Jedná se o účinnost celé jednotky motor+měnič Sevcon Gen4

<sup>c</sup> Závisí na limitaci výstupního proudu použitého měniče, ME1302 disponuje  $k_m = 0,18 \text{ Nm A}^{-1}$ , typ AC-20 pak  $k_m = 0,17 \text{ Nm A}^{-1}$

<sup>d</sup> Trvalý výkon ME1302 odpovídá průtoku  $10 \text{ l min}^{-1}$  chladicího média GW50 při vstupní teplotě 40 °C. U typu AC-20 je trvalý výkon omezen požadavkem na utěsněné provedení bez ventilátoru. Pro další testy se předpokládá výměna stávajícího pláště za nový s vnitřními kanálky a napojení na stávající chladicí okruh vozidla Gen2

**Tabulka 3.3:** Katalogové parametry měničů prototypu DMDS

parametr měniče:	Gen4 size4	Gen4 size6
princip řízení	vektorové	vektorové
provozní napětí	48–132 V	48–120 V
proud 10 s	360 A	660 A
proud 1 h <sup>a</sup>	120 A	140 A
trvalý výkon	13 kW	15 kW
komunikační rozhraní	CAN	CAN
hmotnost <sup>b</sup>	2,7 kg	4,6 kg

<sup>a</sup> Při použití chladiče  $0,2 \text{ °C W}^{-1}$ , bez nuceného chlazení

<sup>b</sup> Bez chladiče a připojovacích vodičů

<sup>17</sup> Měniče Sevcon Gen4 používá automobilka Renault ve svém BEV modelu Twizy.

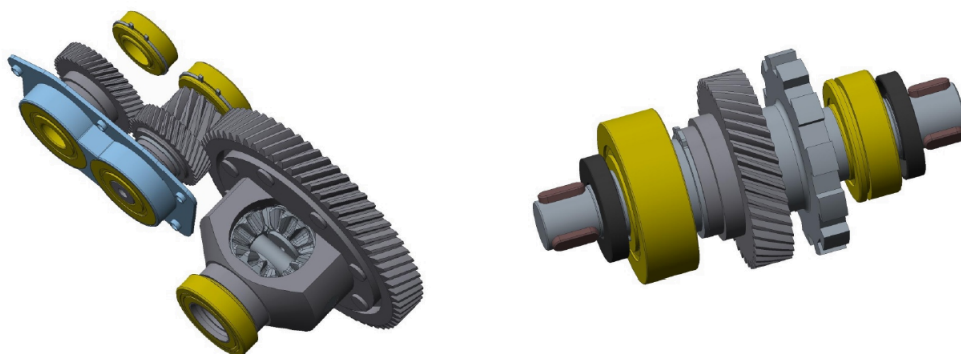
<sup>18</sup> Oficiálním zastoupením pro ČR je společnost EVC group s.r.o. se sídlem v Hulíně.

### 3.3.4 Návrh jednorychlostní převodovky

Z parametrů trakčních elektromotorů pro ústrojí DMDS následně vychází základní požadavky na vlastnosti SST převodovky. Požadovaný maximální vstupní moment je 200 Nm a maximální pracovní otáčky  $8000 \text{ ot. min}^{-1}$ . Celkový převodový poměr pak v rozsahu  $i_c = 6 - 7$  pro maximální rychlost vozidla  $150\text{--}130 \text{ km h}^{-1}$ .

Vzhledem k faktu, že podobných koncepcí SST převodovek, vyhovujících navrženému DMDS není na trhu mnoho<sup>19</sup>, padlo rozhodnutí navrhnout a realizovat vlastní prototyp převodovky<sup>20</sup>. Pro minimalizaci obtíží, které by představovaly návrh a především zajištění výroby soukolí převodovky a diferenciálu, jsme učinili rozhodnutí převzít a následně upravit tyto klíčové díly ze stávajících převodovek koncernu VW.

Jednalo se především o dvě ozubená soukolí z převodovky MQ200 02T. Díky původnímu umístění soukolí čtvrtého rychlostního stupně, těsně vedle soukolí rozvodovky, bylo možné použít i hnanou hřídel včetně hnacího kola rozvodovky. Avšak vzhledem k uspořádání převodovky se dvěma vstupy na hnací hřídeli nebylo možné použít původní hnací hřídel a bylo nutné navrhnout hřídel novou. Tato je oproti původní hřídeli kratší a navíc nese kolo parkovací západky. Rozvodovka s diferenciálem je také oproti původnímu umístění otočena o  $180^\circ$  z důvodu zkrácení výsledné hloubky převodovky. Díly s provedenými úpravami jsou vyobrazeny na obr. 3.4.



**Obrázek 3.4:** Komponenty navržené SST. *vlevo:* Díly MQ200 02T, přírubové hřídele zde nejsou vyobrazeny. *vpravo:* Nové uspořádání hnacího hřídele. Na obou stranách hřídele jsou navrženy spoje těsnými pery pro připojení elektromotorů pomocí pevných spojek

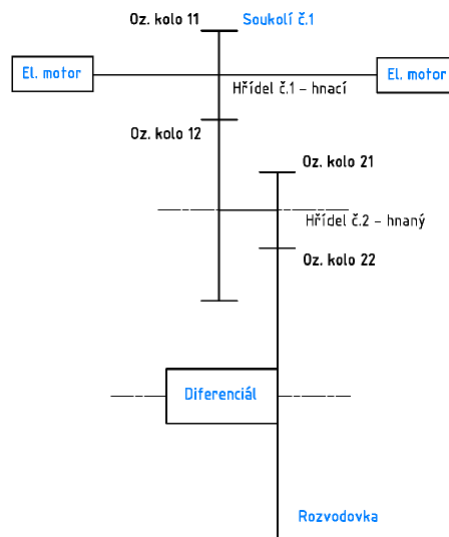
#### • Uspořádání převodovky

V navrženém uspořádání převodovky je každý z motorů umístěn na jedné straně převodovky a točivý moment obou motorů je přiváděn na společnou hnací hřídel viz obr. 3.5. Jako soukolí č. 1 je zde použit čtvrtý rychlostní stupeň z převodovky MQ200 02T. Stejně tak i soukolí rozvodovky s diferenciálem. Diferenciál je použitý včetně přírubových hřídelů, což umožňuje připojení koncernových příčných hnacích hřídelů, které byly použity již v první generaci vozidla. Motory jsou vůči podélné ose vozu uloženy napříč před přední nápravou.

<sup>19</sup> Největší limitace je v podobě příruby a drážkování hřídele pro připojení elektromotorů.

<sup>20</sup> Hlavní vývojové práce na převodovce vedl kolega Josef Břoušek z KVM [66].

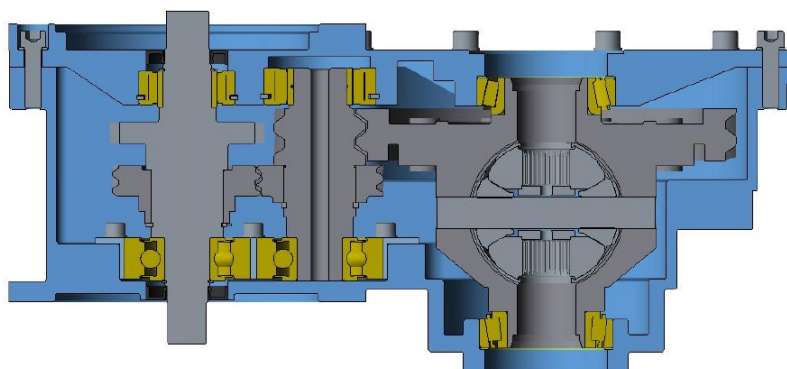




**Obrázek 3.5:** Návrh vnitřního uspořádání soukolí DMDS převodovky

- **Konstrukce skříně převodovky**

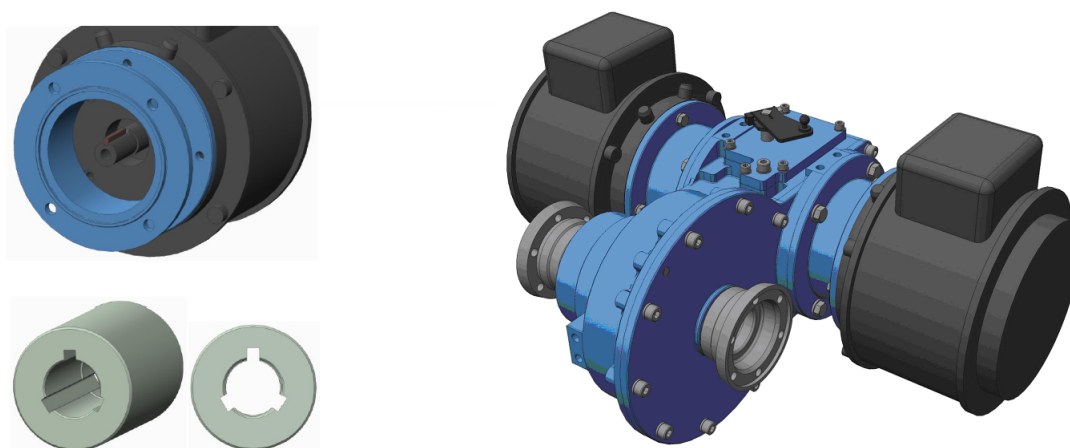
Skříň převodovky je zhotovena z hliníkové slitiny. Vzhledem k tomu, že se jedná o prototyp, byla zvolena technologie výroby pomocí třískového obrábění na CNC frézce. Této technologii pak byly podřízeny tvary skříně převodovky. Skříň převodovky byla navržena s ohledem na nízkou hmotnost při dostatečné tuhosti konstrukce. Vzhledem k požadavku na vzájemnou sousost, jsou víko a skříň vůči sobě zajištěny přesnými kolíky. Materiál pro výrobu skříně prototypu je EN AW 7021 [AlZn5,5Mg1,5]. Tento materiál vykazuje extrémně nízké vnitřní pnutí, velmi dobrou tvarovou stálost, pevnost a také velmi dobrou obrobitelnost. Pro plnění a vypouštění oleje jsou na převodovce vytvořeny dva otvory se zátkami. Použit je stejný typ syntetického oleje jako v původní převodovce MQ200, typ G 50 SAE 75 W 90 v celkovém objemu 0,8 l. Hmotnost skříně převodovky včetně přírub pro připojení elektromotorů je 8 kg. Kompletní převodovka včetně náplně váží 22 kg.



**Obrázek 3.6:** Řez konstrukcí DMDS převodovky

- Připojení elektromotorů k převodovce a uložení ve voze

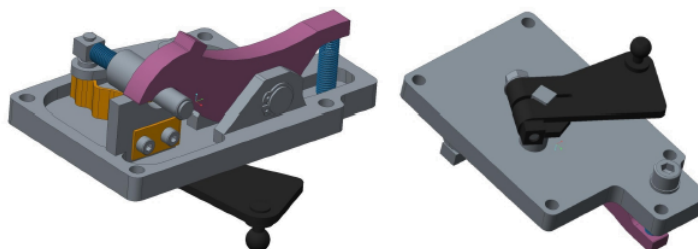
Oba typy elektromotorů disponují standardní přírubou NEMA C-face a výstupním hřídelem s drážkou. Pro jejich připevnění ke skříni převodovky byly navrženy příruby ze stejného materiálu jako skříň převodovky. Spojení s hnací hřídelí převodovky je realizováno pomocí ocelových spojek viz obr. 3.7. Celá sestava DMDS je ve voze uložena před přední nápravou. Zde je zavěšena za skříň převodovky na extrudovaném profilu, který je pružně uložen v silentblocích.



**Obrázek 3.7:** Návrh připojení motorů k SST. *vlevo:* Elektromotor s přírubou a navržená spojka *vpravo:* Kompletní sestava DMDS s dvojicí motorů ME1302

- Mechanismus parkovací západky

Systémy parkovacích západek jsou běžně používány např. v DCT převodovkách, kde jsou při vypnutém motoru obvykle vlastní spojky rozpojeny a vozidlo se tak bez zatažené ruční brzdy může pohybovat. Základní deska západky je navržena pro výrobu frézováním na CNC stroji ze stejného materiálu jako skříň převodovky. Západka je ve voze Gen2 mechanicky ovládaná bowdenem, který vychází z původní volicí páky DSG převodovky koncernu VW.



**Obrázek 3.8:** Mechanismus parkovací západky. Západku tvoří výpalek z materiálu 11 523. Ostatní díly jsou převzaty z převodovky řady DQ koncernu VW

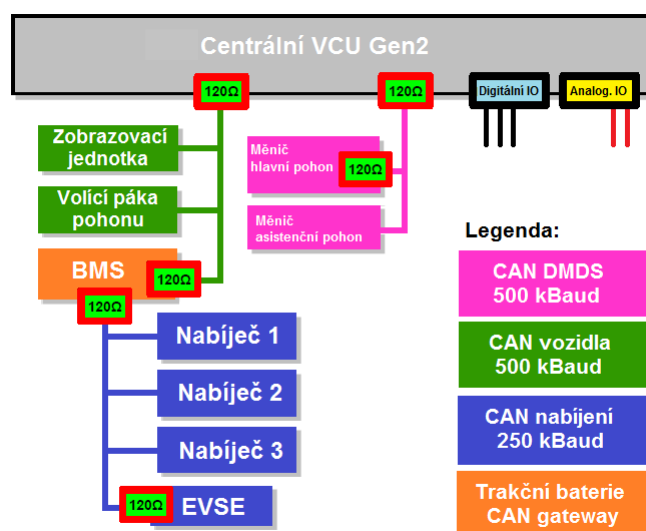


### 3.3.5 Návrh algoritmu řízení a řídicí jednotky

Pro navržené hnací ústrojí DMDS se v budoucnu předpokládá využití specializované řídicí jednotky. V současném řešení tato vychází z původního návrhu VCU, vyvinuté pro Gen1, která již ale disponuje dostatečně výkonným mikrokontrolérem. Jedná se konkrétně o architekturu ARM Cortex M3, pracující s hodinovou frekvencí 84 MHz a výpočetním výkonem 100 MIPS. Jednotka disponuje dvojicí nezávislých sběrnic CAN, kde CAN1 je zde využita pro vlastní řízení hnacího ústrojí DMDS<sup>21</sup> a CAN2 funguje jako gateway pro komunikaci s ostatními jednotkami vozidla viz obr. 3.9.

- Navržený princip činnosti

V první verzi algoritmu řízení DMDS se nepočítá s interakcí se stabilizačním systémem vozidla, neboť jím vozidlo Gen2 zatím nedisponuje. Řídicí veličinou regulace je požadovaný moment DMDS. Tuto veličinu řidič ovlivňuje pomocí pedálu akcelérátoru, jehož signál je v Gen2 zaveden přímo do VCU. Tato pak vypočítá akční zásah a odešle po vyhrazené CAN DMDS požadovaný moment měničům. Následný akční zásah podléhá jak limitům DMDS, nastavených přímo v měničích, tak i limitaci výkonu trakční baterie, přicházejícím po CAN vozidla ze systému BMS.



Obrázek 3.9: Schéma zapojení CAN ve voze Gen2

Prvotní návrh je velmi přímočarý a předpokládá sledování pouze okamžité hodnoty míry sešlápnutí pedálu akcelérátoru. Tento parametr ihned vstupuje do look-up-table, ve které je uložena momentová charakteristika hlavního pohonu. Pokud je přepočtená hodnota momentu vyšší, než je schopen poskytnout hlavní pohon DMDS při daných otáčkách, je automaticky vydán povel k aktivaci asistenčního pohonu. Po uvolnění akcelérátoru řidičem a poklesu požadovaného momentu na hodnotu v rozsahu hlavního pohonu je asistenční pohon deaktivován.

<sup>21</sup> Prakticky se jedná o vzájemnou komunikaci s měniči Sevcon Gen4.

### 3.3.6 Simulace vozidla s navrženým ústrojím

Tabulka 3.4: Parametry prototypu DMDS

parametr hnacího ústrojí:	hodnota
maximální výkon	80 kW při 5500 ot. min <sup>-1</sup>
trvalý výkon	10 kW
záběrový moment	176 Nm
maximální otáčky	8000 ot. min <sup>-1</sup>
převod. poměr	6
hmotnost	85 kg vč. příslušenství

vozidlo: **ESUS GENERATION 2**

šířka pneu	profil pneu	disk R	poloměr kola	obvod kola	převodový poměr	účinnost převodů	souč. rotačních částí v <sup>2)</sup>	hmotnost NEDC <sup>1)</sup>	souč. přilnavosti μ <sub>v</sub> <sup>2)</sup>	přední nápravy lp	zadní nápravy lz	rozvor náprav l	výška těžiště h
195	55	R 15	297,75	1870,82	6	0,95	1,1	800	0,95	1,1	1,362	2,462	0,5

g =	9,81	m/s <sup>2</sup>
f =	0,01	-
ρ =	1,25	kg/m <sup>3</sup>
c <sub>x</sub> =	0,40	-
S <sub>x</sub> =	1,80	m <sup>2</sup>

<b>omezení počátečního zrychlení adheze<sup>3)</sup></b>	
a <sub>zadní_max</sub>	a <sub>přední_max</sub>
ms <sup>-2</sup>	ms <sup>-2</sup>
5,09	4,47

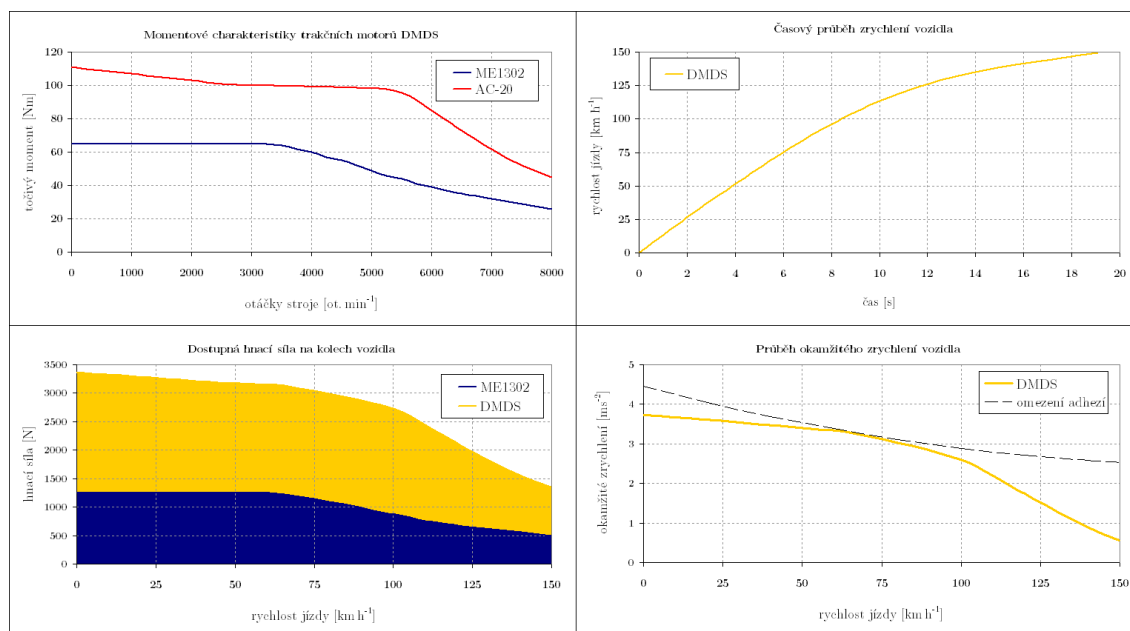
  

čas řazení:  sec

otáčky řazení:  rpm

1) pro simulaci jízdního cyklu NEDC je počítáno s pohotovostní hmotností + 75 kg  
2) empiricky zjištěné hodnoty  
3) na rovině, valivý odpor zanedbán

Obrázek 3.10: Parametry simulace vozidla Gen2 s ústrojím DMDS



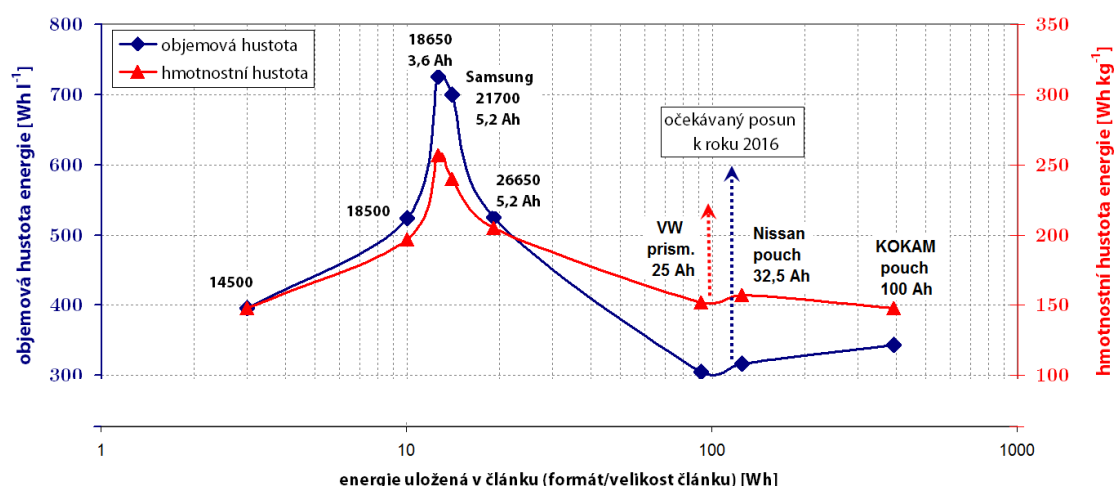
Obrázek 3.11: Grafický výstup simulace vozidla Gen2 s ústrojím DMDS

### 3.3.7 Popis trakční baterie

Bateriová krabice vozu Gen2 vyplňuje celý prostor mezi nápravami a její příčné přepážky se podílí na integrální tuhosti rámu vozidla. Připevnění k rámu vozidla je realizováno přišroubováním přes spodní lem krabice, což otevírá cestu k budoucí implementaci systému automatické výměny trakční baterie. Navržená celohliníková krabice baterie umožňuje osazení moduly s články ve dvou základních modifikacích:

- První umožňuje do krabice instalovat 11 modulů článků s 18,8 kWh energie pro dojezd 220 km dle NEDC, ovšem bez aktivního termálního managementu.
- Druhá využívá termální management pro špičkové zatížení baterie 6C / 960 A. Krabice je pak osazena jen 10 moduly<sup>22</sup> s 17,2 kWh energie pro dojezd 190 km NEDC.
- **Návrh použitých článků a modulů**

Požadavkům na trakční baterie moderních BEV kategorie M1 dlouhodobě nejvíce vyhovují technologie článků NCA–C(Si)<sup>23</sup> a NMC–C(Si) viz příloha C. Kromě chemické struktury významně ovlivňuje specifickou energetickou hustotu i formát článku, respektive jeho velikost. Dlouhodobě nejvyšší specifickou hustotu uložené energie vykazuje formát článku 18650<sup>24</sup>. Články s větší či menší kapacitou, bez ohledu na prizmatické, cylindrické nebo „pouch“<sup>25</sup> provedení, dlouhodobě vykazují signifikantně horší parametry viz obr. 3.12.



**Obrázek 3.12:** Přehled specifické hustoty energie v závislosti na formátu článku

<sup>22</sup> Na místě 11 modulu jsou osazeny komponenty vlastního termálního managementu

<sup>23</sup> Příměs Si nanočástic v C anodě zlepšuje parametry článku. Snahou je zcela přejít na Si anodu.

<sup>24</sup> Válec o nominálním průměru 18 mm a výšce 65 mm s pevným obalem a kapalným elektrolytem.

<sup>25</sup> Struktura článku je laminována do tenké fólie s elektrolytem plastifikovaným do podoby gelu. Článek pak má tvar tenkého pytlíku. Výhodou je především velká plocha článku při minimální tloušťce pro teplotní management a maximální využití prostoru pro instalaci.

Moduly trakční baterie Gen2 jsou navrženy pro cylindrické články Saft VL41M [67] technologie NCA–C. Tyto velkoformátové (144 Wh) články byly před malými (12 Wh) články formátu 18650 preferovány především díky snazší montáži v podmínkách TUL<sup>26</sup>. Pro další generaci baterie již počítáme s přechodem na formát 18650, či nově zaváděné formáty 20700 (Tesla Motors) a 21700 (Samsung SDI)<sup>27</sup>.

Každý modul se skládá z 12 článků v zapojení 3s4p viz obr. 3.14. Články jsou zde staženy mezi dvě čela ze samozhášivého plastu. Terminály článků jsou propojeny ploché Cu profily s průřezem 70 mm<sup>2</sup> a následně překryty plastovým víkem. Ke každé čtveřici článků přísluší jeden 10 k termistor. Jejich vývody spolu s vodiči pro snímání napětí článků jsou vyvedeny na společný konektor pro propojení modulu s BMS.

- **Teplotní management** je založen na vlastnosti materiálu PCM [68] okamžitě přeměnit teplo z článků na změnu své fáze. Tento princip je rozšířen o systém roznášecích plechů, které napomáhají rychlému odvodu tepla z PCM do výměníku v podlaze bateriové krabice viz obr. 3.15. Jedná se tak o hybridní management<sup>28</sup>.
- **Systém BMS** vozidla pochází od společnosti Ewert Energy Systems, Inc. Jedná se o centralizovaný systém s hlavní jednotkou. Balancující proud článku je 100 mA.
- **Systém dobíjení** vozidla Gen2 je realizován pomocí tří jednofázových palubních nabíječek, každá o výkonu 2,3 kW. Pokud je k dispozici třífázová zásuvka, lze nabíjet výkonem 7 kW a vůz je tak možné zcela nabít za 3 h. Vozidlo je vybaveno standardizovaným evropským nabíjecím konektorem „Mennekes“ dle IEC 62196.

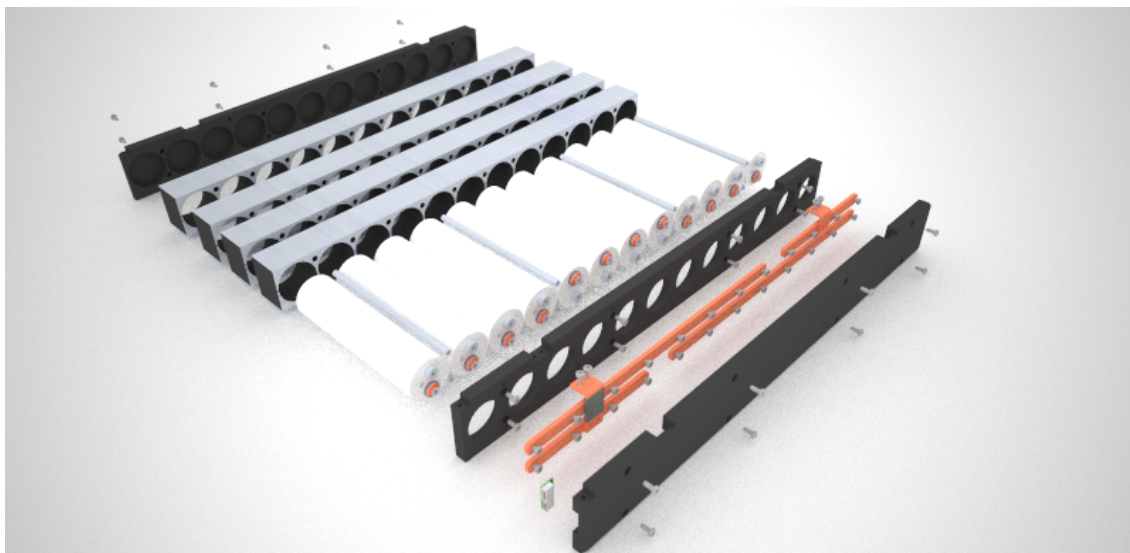


**Obrázek 3.13:** Funkční vzorek trakční baterie vozu Gen2

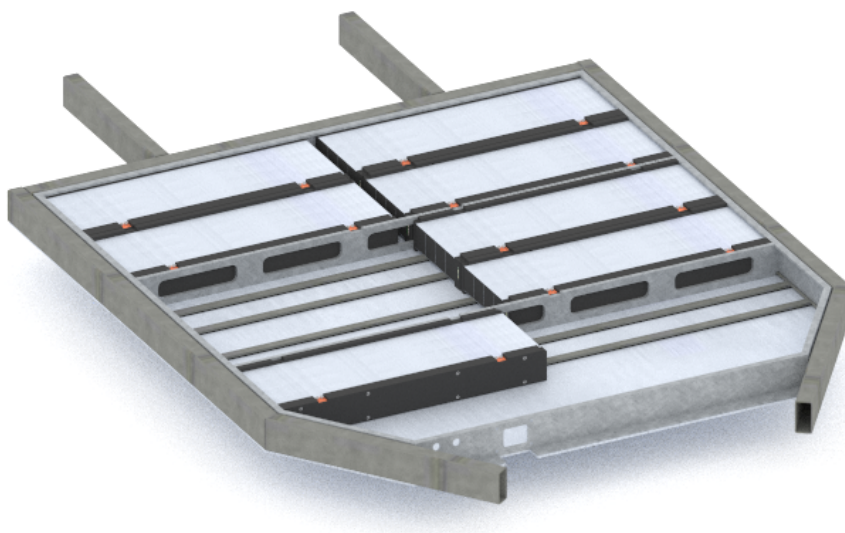
<sup>26</sup> Články VL41M disponují šroubovacími terminály se závitem M5, články 18650 je třeba svařovat.

<sup>27</sup> Tyto, pro BEV navrhované formáty, nabízí kompromis mezi spec. hustotou energie a instalovaným počtem článků. Při asi o 5 % nižší spec. hustotě proti formátu 18650 lze použít o 1/3 méně článků.

<sup>28</sup> Návrh managementu byl diskutován s Greg Albrightem ze společnosti AllCell Technologies, LLC.



**Obrázek 3.14:** Počítačový model rozloženého modulu trakční baterie Gen2. Ve funkčním vzorku baterie jsou použity 3s4p moduly s  $U_n = 12\text{ V}$  bez PCM a kovových roznašečů tepla. V modelu nejsou zakresleny termistory, snímající zvlášť teplotu každé čtveřice paralelně zapojených článků



**Obrázek 3.15:** Počítačový model uložení trakční baterie v podvozkovém rámu vozu Gen2. Na dně bateriové krabice jsou patrné kovové výměníky tepla, kterými proudí chladicí médium, jenž může být sdíleno s klimatizací vozu. V aktuální verzi baterie výměník a jeho komponenty nejsou osazeny. Aby je bylo možno osadit, lze použít pouze 10 modulů



### 3.4 Aktuální stav řešené problematiky

V současné době byla dokončena příprava vybraných funkčních celků na testování a čeká se na dokončení úprav měřicích stanovišť. V laboratoři Powertrain 4×4 budou následně provedeny testy kompletní sestavy DMDS. V laboratoři pohonných jednotek pak ověření charakteristik točivých strojů na dynamometru ASD 235 M250 s rozsahem 235 kW a max. otáčkami 10 000 ot. min<sup>-1</sup>. Po předpokládaném zprovoznění válcové brzdy 4×2 Froude Consine V 6000 na jaře roku 2016 budou provedeny testy normalizovaných jízdních cyklů na kompletním vozidle Gen2.

- **Hnací ústrojí DMDS** Dosud se podařilo získat dvojici motorů ME1302 s měniči Sevcon Gen4 Size4. Objednávka motoru AC-20 a výkonnějšího měniče Size6 se nyní vyřizuje. Díly jednorychlostní převodovky byly již dodány a tato smontována.
- **Trakční baterie Gen2** Byla v první modifikaci (bez termálního managementu) dokončena v létě roku 2015. Dosud byly ověřeny její vlastnosti při zatěžování do výkonu 5 kW a proces nabíjení vč. balancování článků. Připravuje se objednávka PCM materiálu a služeb pro jeho frézování spolu s výrobou plechových roznašečů.

V nejbližší době je v plánu provést tyto ověřovací testy:

1. Naměření úplných momentových charakteristik motorů a map účinnosti.
2. Ověření vlastností trakční baterie při špičkovém zatížení 6C / 960 A.
3. Implementace algoritmu řízení DMDS do VCU a jeho následné ladění.



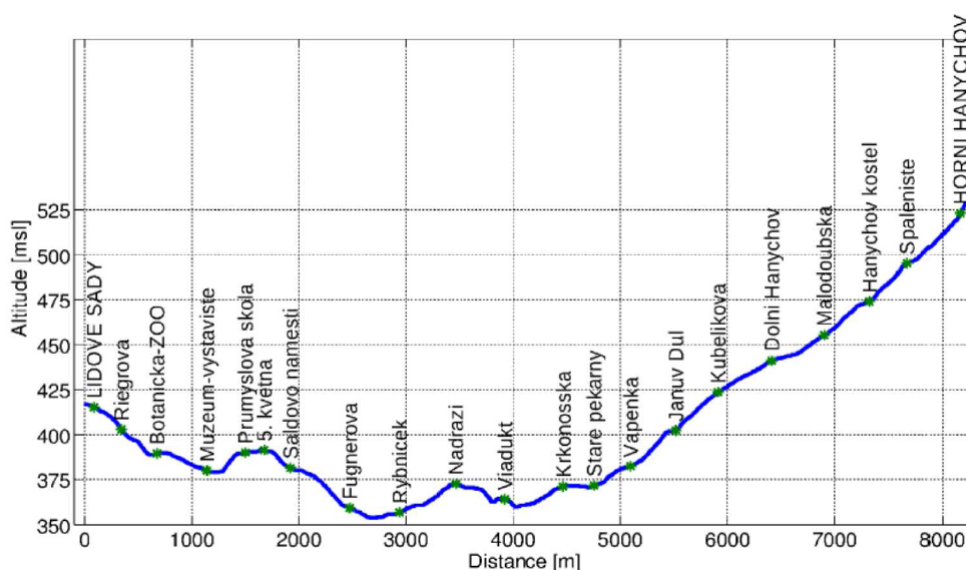
Obrázek 3.16: Elektromobil Gen2 představený na MSV Brno 2015

## 4 Energetická bilance provozu městské stejnosměrné trakce

Cílem kapitoly je analyzovat přínos instalace systému dočasného ukládání elektrické energie (ESS) pro zefektivnění energetické bilance v reálném tramvajovém provozu.

### 4.1 Tramvajový provoz v Liberci

V tomto konkrétním případě pak pro trať liberecké linky č.3, propojující městské části Lidové sady – Horní Hanychov<sup>1</sup>. Tato trať byla vybrána, díky svému výškovému profilu s vysokým rozdílem nadmořských výšek a minimálnímu podílu rovinné trati viz obrázek 4.1 a údaje v tabulce D.1.



Obrázek 4.1: Grafické zobrazení výškového profilu tratě linky č.3

Navrhované energetické úložiště by mělo výrazně přispět k celkové efektivnosti při nakládání s elektrickou energií. Ať už formou maximálního využití rekuperované energie, tak kompenzací odběrových špiček, vznikajících během provozu na trati.

<sup>1</sup> Souběžně provozována linka č.2, obsluhuje pouze úsek tratě Lidové sady – Dolní Hanychov. Úsek Fügnerova – Viadukt využívají i linky č.5 a č.11, pokračující ve směru na Jablonec nad Nisou.



**Tabulka 4.1:** Vybrané parametry tratě

parametr	hodnota
celková délka tratě	8223 m
nejdelší úsek stoupání	201 m
nejdelší úsek klesání	90 m
max. stoupání	100 ‰
max. klesání	78 ‰
podíl rovinné tratě	0 m

#### 4.1.1 Současné řešení napájení tramvajové tratě

Celá trať je ve standardním režimu napájena ze dvou centrálních stanic – trakčních měníren<sup>2</sup>. Zapojení trakční měnírny je obvykle následující. Rozvod vysokého napětí 22 / 35 kV 50 Hz je přiveden do sběrné stanice, odkud dále pokračuje přes samočinný bezpečnostní odpojovač a manuální vypínač do distribučního transformátoru. Zde dochází k transformaci napětí na hodnotu 525 / 650 V a vytvoření napájecí soustavy typu IT. Toto nízké napětí pak vstupuje do usměrňovače, na jehož výstupu je stejnosměrné napětí 660 / 750 V naprázdno<sup>3</sup>. Finálně je toto napětí rozvedeno přes odpojovače zpětných kabelů a rychlovypínače napájecích kabelů kombinované s odpojovači do trolejového vedení. Vlastní stejnosměrný rozvod je realizován jako jednostopý, kde kladný pól napájecí soustavy je veden v troleji.

- **Měnírna v Dolním Hanychově** napájí trať v úseku od stanice Staré pekárny po konečnou stanici v Horním Hanychově. Tento úsek je dále rozdělen do šesti sekcí, přičemž všechny sekce jsou napájeny ze společné jednotky pro usměrnění proudu, tzv. napaječe. Stanice disponuje dvěma transformátory, každý o jmenovitém výkonu 1100 kVA / 35 kV. Usměrňovač je polovodičový 12–ti pulzní. Měnírna, v době zahájení projektu, již disponovala systémem měření, který umožňuje průběžný monitoring odebíraných proudů a velikosti napětí na troleji. Tento systém pracuje se vzorkovací periodou 1 s a data z databáze tohoto systému byla využita při některých analýzách.
- **Měnírna v ulici Tatranská** je situována ve středu města v blízkosti vozoven a napájí trať v úseku Staré pekárny–Lidové sady. Tento úsek je rozdělen na pět sekcí. Z této měnírny je rovněž napájena jedna sekce pokrývající prostor vozovny a první úsek odbočky trati na Vratislavice nad Nisou. Měnírna Tatranská je generačně starší než měnírna v Dolním Hanychově. Usměrňovač je zde polovodičový diodový v šestipulzním zapojení. Měnírna tak nemůže pracovat v obousměrném provozu a energie, která jednou projde přes distribuční transformátor na stejnosměrnou stranu, již musí být využita, nebo zmařena ve stejnosměrné soustavě DPMLJ. Tato měnírna nedisponovala v okamžiku začátku projektu systémem umožňujícím průběžný monitoring a záznam provozních veličin v elektronické podobě.

<sup>2</sup> V době řešení projektu nebyly trakční měnírny propojeny. Obě tak napájí pouze svůj úsek tratě.

<sup>3</sup> DPMLJ využívá ve svém tramvajovém provozu jmenovité stejnosměrné napětí 600 V.

#### 4.1.2 Současný vozový park provozovaný na trati

Dopravní podnik provozuje celou řadu různých typů tramvají, z nichž některé jsou unikátní typy. Jako nosný typ je používána tramvaj T3 v mnoha modernizovaných verzích jako jsou T3SUCS, T3R.PV, T3R.PLF a dále pak T3R.SLF. Elektrická stejnosměrná výzbroj tramvají je dle typu buď Cegelec nebo Škoda Electric. Obě používané trakční výzbroje jsou postaveny na technologii IGBT tranzistorů, řízených specializovaným mikrokontrolérem a disponují rekuperační brzdou. Nejnovějším typem tramvaje provozované DPMLJ je moderní, zcela nízkopodlažní vůz EVO2 s výzbrojí Škoda Electric.

Tramvaj T3 tak díky svému nadčasovému designu, modernizované výzbroji a nově i přítomností nízkopodlažních prvků, stále splňuje hlavní požadavky na moderní vůz 21. století. Dopravní podnik měst Liberce a Jablonce nad Nisou vlastní 62 tramvajových vozů, z nichž zhruba 40 denně vyjíždí na dvě tramvajové tratě. Z celkového počtu 62 tramvají jsou již cca  $\frac{2}{3}$  modernizovány a zbývající tramvaje jsou postupně modernizovány na moderní tranzistorové řízení. Jako základ pro studii o využití energetického úložiště byl zvolen modernizovaný vůz T3 s nízkopodlažní částí s označením T3R.PLF viz obrázek 4.2. Tato tramvaj je vybavena tyristorovým řízením od francouzské společnosti Cegelec.



**Obrázek 4.2:** Modernizovaný vůz T3R.PLF v barvách DPMLJ na konečné stanici Lidové sady v Liberci. Tento typ vozu, vybavený trakční výzbrojí Cegelec, typ TV Progress, byl využíván pro měření v rámci projektu

### 4.1.3 Současný stav využívání rekuperované energie

Skutečnost, že většina tramvají provozovaných DPMLJ je již vybavena moderní trakční výzbrojí umožňující rekuperaci brzděné energie, předjímá úvahy o jejím optimálním využití. Princip nakládání s rekuperovanou energií v době řešení projektu fungoval následovně. V okamžiku, kdy tramvajový vůz začne brzdit, generuje svými motory elektrickou energii. Tato je přenesena do trolejového vedení a projeví se zvýšením napětí v daném úseku. Díky tomu bude rekuperovaná energie vždy spotřebována přednostně, ať už jiným vozem či ostatními spotřebiči v tomto úseku. Pokud však v daném čase není k dispozici takový spotřebič, který bude schopen spotřebovat všechnu energii, nastane skokový nárůst napětí až k limitní hodnotě 825 V. V tomto okamžiku řídicí jednotka trakční výzbroje vozu automaticky aktivuje brzdňý odporník, jímž je každý tramvajový vůz vybaven, a nespotřebovanou energii rekuperace v něm zmaří prostřednictvím vyzářeného tepla.

Vzhledem k stávajícímu jízdnímu řádu, který ovlivňuje hustotu provozu a vzájemnou pozici jednotlivých vozů na dané trati, lze předpokládat, že významná část energie získaná rekuperací bude zmařena. Tento předpoklad pak platí zejména pro letní období<sup>4</sup>. Během zimního období, při teplotách pod 0 °C, se v Liberci využívá část této energie na technologické účely pro vytápění výhybek, ostrůvků, atd.

## 4.2 Simulace jízdy tramvaje pro danou trať

Vzhledem k zaměření této části práce, na posouzení přínosu energetického úložiště pro tramvajový provoz, zde nejsou podrobně studovány možnosti uspořádání hnacího ústrojí tramvaje a volba trakčních elektromotorů. Vlastní simulace se tak zaměřuje na energetickou bilanci daného hnacího ústrojí během jízdy dle profilu a využití konkrétní tratě<sup>5</sup>. Princip simulace kolejového vozidla vychází ze stejné rovnice (4.1) jako simulace silničních vozidel a využívá původní simulační prostředí, upravené pro specifika kolejových vozidel.

Vyjádření potřebné hnací síly vozidla pro překonání jízdních odporů:

$$F_k = \sum_i O_i \quad (4.1)$$

Mezi fundamentální jízdní odpory, se v případě kolejových vozidel počítá i redukováný odpor traťový  $O_t$ , ve kterém je již obvykle započítán odpor stoupání.

$$F_k = O_f + O_v \pm O_a + O_{t_{red}} \quad (4.2)$$

<sup>4</sup> Vozy DPMLJ nejsou vybaveny klimatizací salónu, která obvykle disponuje značným příkonem a tedy by sloužila jako další spotřebič, který by přednostně využíval rekuperované energie. Vozy DPMLJ disponují pouze klimatizací pro kabinu řidiče.

<sup>5</sup> Vzhledem k naprosto odlišným místním podmínkám jednotlivých tratí se normalizované jízdní cykly pro tramvajový provoz nepoužívají.

Mezi nejvýznamnější traťové odpory patří již zmíněný odpor stoupání resp. klesání trati  $O_s$ , odpor jízdy v oblouku  $O_r$  a přídavný aerodynamický odpor jízdy v tunelu  $O_{v_{tunnel}}$ . V praxi se všechny traťové odpory vyjadřují pomocí jediného koeficientu  $O_{t_{red}}$ , který pro zjednodušení výpočtů simulace považujeme za konstantní pro vybraný, tzv. redukovaný úsek trati.

$$O_{t_{red}} = \pm O_s + O_r + O_{v_{tunnel}} \quad (4.3)$$

**Odpor jízdy v oblouku  $O_r$**  se obvykle vyjadřuje pomocí empirického vztahu (4.4), který číselně odpovídá sklonu  $s_r$  (‰), který se uplatní na délku teoretického kružnicového oblouku  $r$ .

$$O_r = s_r = \frac{600}{r} \quad (4.4)$$

**Odpor jízdy v tunelu  $O_{v_{tunnel}}$**  se aproximuje zvýšením stoupání trati o 2 ‰<sup>6</sup>.

Jízdní odpory  $O_f$  a  $O_v$  jsou obecně označovány jako vozidlové odpory. Jejich absolutní hodnotu ovlivňuje zejména aktuální hmotnost a rychlost jízdy vozidla. Nicméně vozidlové odpory nemají v městském provozu tramvají zásadní vliv na celkovou spotřebu. Například pro tramvaj T3 při jízdě max. provozní rychlostí<sup>7</sup> 65 km h<sup>-1</sup> vychází pro prázdný vůz (18 t) odpovídající výkon motoru 28,5 kW a 33 kW pro plně obsazenou (27,5 t), tj. rozdíl potřebného výkonu necelých 14 % při navýšení hmotnosti vozu o 66 %<sup>8</sup>.

Je tedy zřejmé, že instalovaný výkon hnacího ústrojí tramvaje T3, 4×40 kW pro původní verzi se sériovými motory ČKD TE022J, resp. 4×44 kW u modernizovaných verzí s motory TE022H(TE033), je zapotřebí zejména pro dostatečnou pružnost při urychlování jízdy tramvaje. Maximální počáteční zrychlení se pohybuje dle typu elektrické výzbroje kolem hodnoty 1,65 ms<sup>-2</sup>.

Právě absolutní velikost zrychlení a plynulost rozjezdu má hlavní vliv na celkovou spotřebu při provozu na dané trati. Pokud při rovnoměrném přímočarém pohybu má hmotnost kolejového vozidla jen minimální dopad na celkový jízdní odpor, pak při urychlování působí již velmi významně ve formě hmotových sil setrvačnosti dle II. Newtonova zákona:

$$\sum F_x = ma \quad (4.5)$$

Danou formuli je třeba doplnit o vliv rotujících součástí vozu, obvykle vyjadřovanou empirickým bezrozměrným koeficientem součinitele rotačních částí  $\vartheta$ <sup>9</sup>. Díky podrobné analýze hnacího ústrojí tramvaje T3, provedené v rámci projektu TA03030420 - *Metody testování trakčních motorů v tramvajových podvozcích*, byly

<sup>6</sup> Uvažuje se jen pro tunely delší než 100 m, které se v Liberci nevyskytují.

<sup>7</sup> Omezena max. otáčkami elektromotoru TE022 při daném převodovém poměru  $i = 7,43$

<sup>8</sup> Tyto hodnoty platí pro jízdu po rovině za bezvětří a jedná se o mechanický výkon na hřídeli motoru s již započítanými ztrátami v převodových ústrojích a ložiskách.

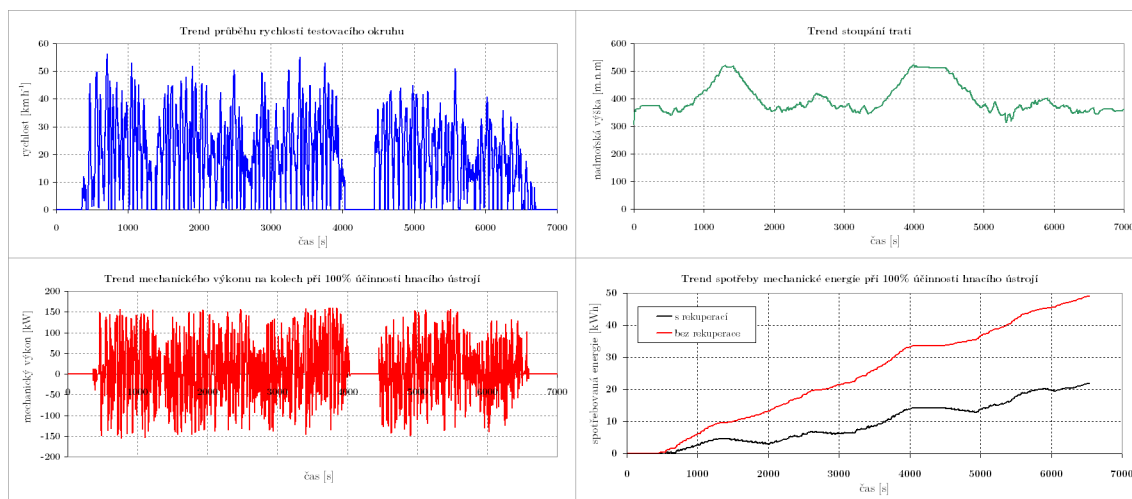
<sup>9</sup> Pro tramvaje se uvádí hodnota 1,2 [70].

nalezeny hodnoty hmotnostního momentu setrvačnosti všech částí hnacího ústrojí. Tyto pak po dosazení do vzorce (4.6) umožňují přesné určení odporu zrychlení.

$$O_a = \left[ 1 + \frac{4[(J_m i_c^2 + J_p i_c^2) \eta + J_k]}{r_d^2} \right] ma \quad (4.6)$$

Pro účely srovnání s dříve naměřenými daty skutečné jízdy byly do upraveného simulačního prostředí zadány průběhy zrychlení a stoupání tramvaje v měřeném úseku. Parametry tramvajového vozu T3R.PLF, vstupující do simulace, vycházejí z technické dokumentace vozu [69] a parametrů hnacího ústrojí viz příloha E.

Okamžité zrychlení vozidla a stoupání trati bylo přepočítáno z dat naměřených pomocí GPS modulu a následně filtrovaných, proto je patrný drobný nesoulad u trendu simulovaného průběhu mechanického výkonu na kolech na obr. 4.3 a naměřeného elektrického příkonu za sběračem na obr. 4.10.



Obrázek 4.3: Simulace tramvajového vozu T3R.PLF pro danou trať

#### 4.2.1 Vyhodnocení výsledků simulace

Pro daný úsek tratě musí pohonná jednotka vykonat práci 24,1 kWh včetně rekuperace nebo 58,8 kWh bez možnosti využití rekuperace. V těchto hodnotách ale úmyslně není započtena mechanická účinnost hnacího ústrojí ani trakčních motorů pro možnost vyšetření poměru rekuperace na trati. Z daných výsledků plyne, že na daném úseku lze získat zpět až 58 % z celkového množství mechanické energie, potřebné pro pohon vozidla.

Měření ve voze na tomto úseku zaznamenalo spotřebu 49,4 kWh včetně rekuperace a přepočtem 75,2 kWh bez rekuperace. Takto bylo získáno zpět 34 % z celkového množství energie. Celková účinnost pohonu na měřené trati vychází po konfrontaci cca 50 %, což odpovídá předpokladům účinnosti převodového ústrojí 90 % a střední účinnosti trakčních elektromotorů 60 % v tomto režimu.

## 4.3 Měření na daném úseku trati

### 4.3.1 Cíle měření

Pro vypracování analýzy vhodnosti nasazení úložiště rekuperované energie a jeho dimenzování, je třeba získat dostatečně vypovídající data z dlouhodobého reálného provozu. V případě této analýzy se technologie rozpadá na dva samostatné celky. Prvním celkem je tramvajový vůz, druhým pak měnírna. Pochopitelně je mezi nimi vazba, která může obecně fungovat obousměrně. Přenosové cesty elektrické energie tak mohou být uzavřeny, jak ve směru od měnírny k tramvaji, tak v opačném směru od tramvaje k měnírně. Rovněž je zde přenosová cesta mezi dvěma tramvajovými vozy pohybujícími se v úseku trati se společným napájecím bodem. Nutnost sledování jednotlivých cest a použitelnost přenášené elektrické energie závisí na konkrétní elektrické výzbroji měnírny i každé tramvaje.

#### Primární cíle měření v trakčních měnírnách:

- Monitorování situace na trati z hlediska aktuálních odběrů proudu a trolejového napětí v různých provozních režimech a situacích<sup>10</sup>.
- Analýza a výpočty energetických toků (balance, tendence a dynamika) s cílem zjistit průběh spotřeby elektrické energie a definovat množství rekuperovatelné energie.
- Ověření simulačního modelu tramvaje ve vztahu k celé trati a reálnému provozu.
- Stávající elektrické vybavení měnírny v ulici Tatranská nedovoluje zpětný tok elektrické energie a není tak možné přímo měřit velikost rekuperovaného proudu. Měnírna v Dolním Hanychově sice má možnost zpětného toku elektrické energie do sítě, tato možnost však není využívána z důvodu smluvního vztahu s dodavatelem elektrické energie a opět tedy není možné přímo měřit množství rekuperované energie. Tento nedostatek je ale možné pokrýt díky měření v tramvajovém voze.

#### Primární cíle měření v tramvajovém voze:

- Monitorování okamžitých spotřeb elektrické energie, odběru proudu a napětí za sběračem jednoho vozu v různých podmínkách provozu<sup>11</sup>.
- Analýza a výpočty energetických toků (balance, tendence, dynamika) s cílem zjistit průběh spotřeby elektrické energie a určit poměr energie, kterou lze rekuperovat.
- Doplnění chybějící informace o rekuperaci k datům z trakčních měření.
- Kalibrace simulačního modelu tramvajového vozu po stránce elektrické spotřeby, účinnosti a mechanických ztrát.

<sup>10</sup> Letní vs. zimní provoz, pracovní den vs. volné dny, ranní a odpolední špička vs. noční provoz, atd.

<sup>11</sup> Letní vs. zimní provoz, rozjezd vs. brzdění, atd.



### 4.3.2 Měření v tramvajovém voze

Pro vyšetřování energetických toků byly využity záznamy získané během předchozí spolupráce TUL s DPMLJ [71], které byly doplněny o nová měření. Díky této skutečnosti bylo již k dispozici senzorické a přístrojové vybavení, potřebné pro mobilní měření. V průběhu řešení pak byly některé komponenty pro měření a záznam dat doplněny. Zaznamenávány byly údaje využitelné pro analýzu energetických toků. Byla provedena speciální měření s cílem doplnit tyto záznamy o údaje s okamžitou polohou vozu na trati, nadmořskou výškou a rychlosti z GPS. V tramvaji byl zaznamenáván proud i trolejové napětí, měřené za sběračem vozu. K měření spotřeby tramvajového vozu byly navrženy dva měřicí systémy. První byl použit při speciálních nočních jízdách a počátečních měřeních spotřeby jednotlivých výzbrojí tramvajových vozů, druhý pak na souhrnná provozní měření.

**První měřicí systém** byl založen na použití měřicí karty National Instrument, typ NI 6212 a přenosného počítače. Měřicí karta obsahuje 16 analogových vstupů s maximální vzorkovací frekvencí  $400 \text{ kSa s}^{-1}$  s rozlišovací schopností 16 bitů. Trolejové napětí je měřeno pomocí napěťové diferenciální sondy SI-9002, která umožňuje měřit stejnosměrné napětí v rozsahu  $\pm 1400 \text{ V}$  s výstupem  $\pm 10 \text{ V}$ . Proud je měřen stejnosměrnou proudovou sondou PAC 12 s rozsahem  $\pm 600 \text{ A}$  při výstupním napětí  $\pm 10 \text{ V}$ . Nastavení a odečítání dat z měřicí karty National Instruments je realizováno pomocí Data Acquisition Toolboxu, který je součástí prostředí Matlab, běžícím na přenosném počítači. Tento měřicí systém umožňuje vzorkování s periodou 100 ms.

Měřicí karta NI nasnímá vždy 2560 vzorků během každé periody 100 ms. Z těchto je pak vypočtena střední hodnota, která je vložena do souboru naměřených dat. Každé dvě a půl minuty je tento soubor uložen na disk přenosného počítače. Zapojení jednotlivých sond a umístění měřicí karty v tramvajovém voze je vyobrazeno na 4.4.

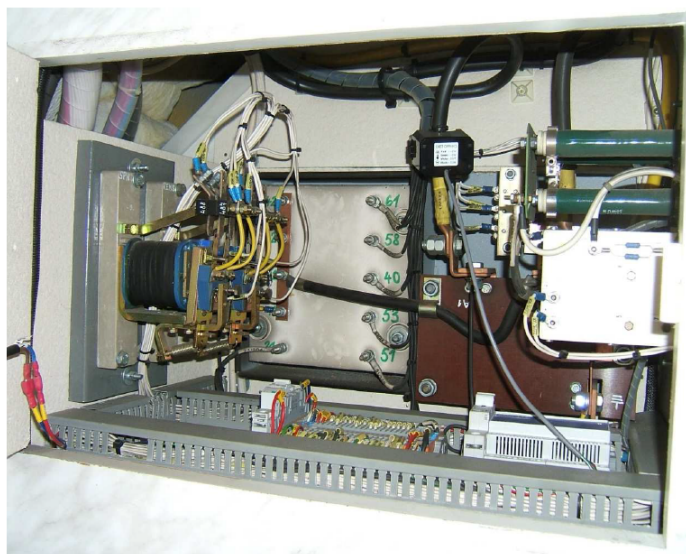


**Obrázek 4.4:** Instalace měřicí techniky ve voze T3R.PLF. *vlevo:* Umístění měřicích sond v rozvaděčové skříni. *vpravo:* Umístění notebooku a měřicí karty

Takto koncipovaný měřicí systém však není ideální pro dlouhodobá provozní měření a proto byl na požadavek DPMLJ vyvinut ve spolupráci se společností KMB speciální analyzátor SMC 144.

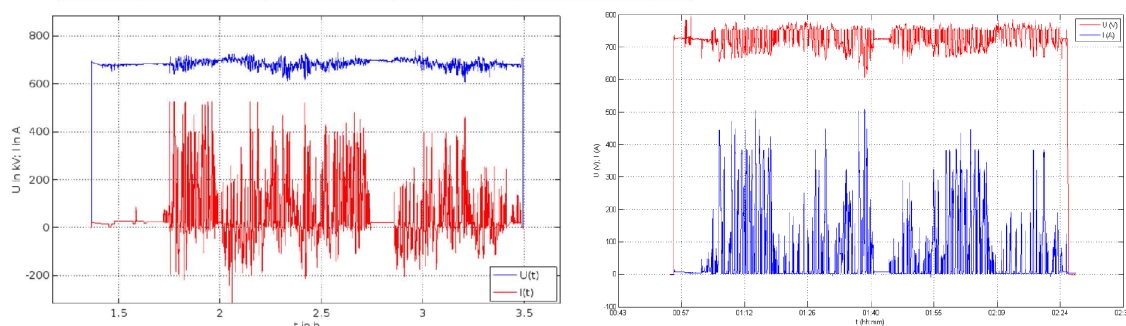


**Druhý měřicí systém** na bázi analyzátoru SMC 144 odstraňuje největší provozní nedostatek prvního řešení v podobě nutnosti použití přenosného počítače. Analyzátor, napájený stejnosměrným napětím 24 V, je doplněn sondou pro měření stejnosměrného proudu do  $\pm 500$  A a jeho napěťový vstup je upraven pro měření napětí v rozsahu  $\pm 1500$  V. Analyzátor měří s nižší vzorkovací periodou 200 ms, která se ukázala být dostatečně vypovídající. Naměřená data jsou ukládána na interní paměťovou kartu analyzátoru o velikosti 512 MB. Takto velká paměť vydrží zhruba 4 dny plného provozu tzn., tramvaj je pod napětím min. 12 h denně. Umístění analyzátoru v tramvajovém voze je na obr. 4.5.



**Obrázek 4.5:** Umístění analyzátoru SMC 144 a měřicích sond v rozvaděčové skříni

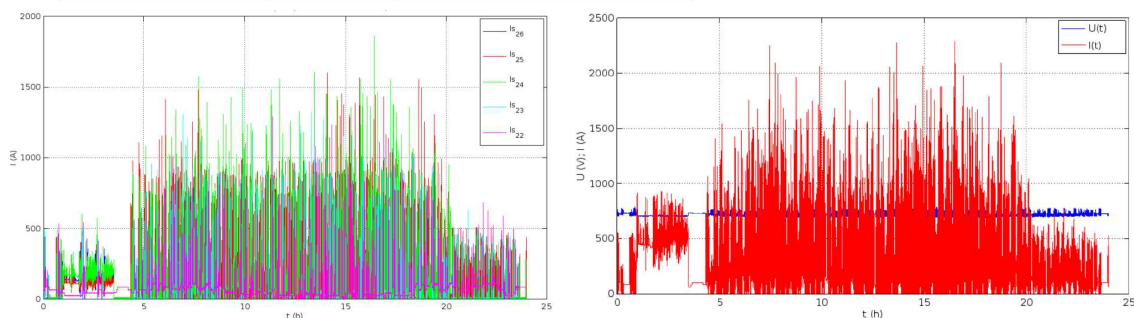
Na následujícím obrázku 4.6 je grafický výstup naměřených dat pořízený měřicím systémem. Data byla zaznamenána během nočních jízd, vždy pro jeden vůz na trati. Na záznamu ze zimního období lze dobře pozorovat vliv využívání rekuperované energie na vyhřívání vozu i ostatních zařízení provozu. Tímto odběrem dochází k mnohem nižším napěťovým špičkám vůči jmenovitému napětí v troleji než v letním období, kdy je rekuperovaná energie mařena výhradně v odporníku trakční výbroje.



**Obrázek 4.6:** *vlevo:* Záznam ze zimního období. *vpravo:* Záznam z letního období

### 4.3.3 Měření v měnírně v Dolním Hanychově

Mězírna v Dolním Hanychově byla na počátku projektu jedinou mězírnou, která umožňovala měření přímo na trolejovém vedení. Mězírna je osazena měřicím systémem, který každou sekundu ukládá hodnoty napětí a proudu v jednotlivých trakčních úsecích a proudu z hlavního napaječe.



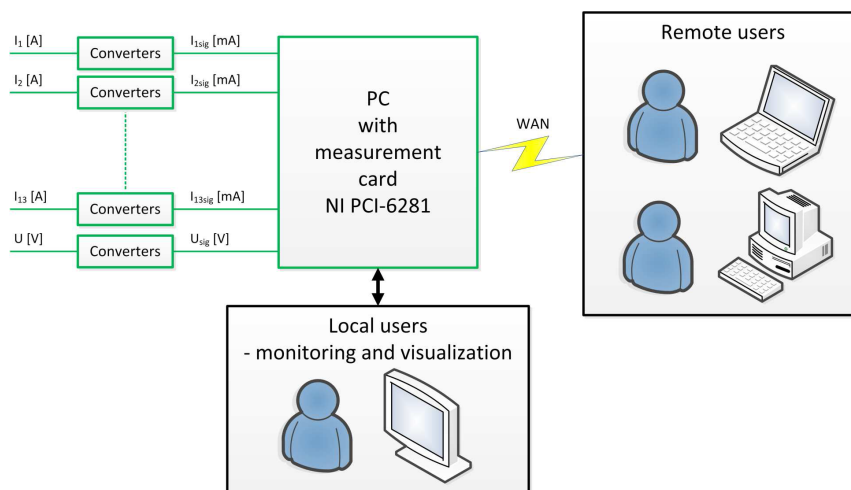
Obrázek 4.7: *vlevo*: Proudů úseků  $I_{s22-26}$ . *vpravo*: Výstup z usměrňovače

Průběhy okamžitých proudů na jednotlivých trakčních úsecích se vzorkovací periodou 1 s jsou uvedeny na obr. 4.7. Zvolený příklad odběru odpovídá dni 7. 12. 2014. Byl to den, ve kterém probíhalo noční měření ve voze, a proto v době mezi 1:00–3:00 h jsou odběry, které odpovídají právě této jízdě. Hodnoty v době mezi 4:00–24:00 h již odpovídají běžnému provozu. Na témže obrázku je i průběh proudů z napaječe, které prochází do jednotlivých trakčních úseků. Do celkového součtu se promítá aktuální stav na tramvajové trati, který je ovlivněn řadou parametrů, jako je počet projíždějících tramvají, jejich hmotnost, akcelerace a aktuální poloha vozů na trati.

### 4.3.4 Měření v měnírně v ulici Tatranská

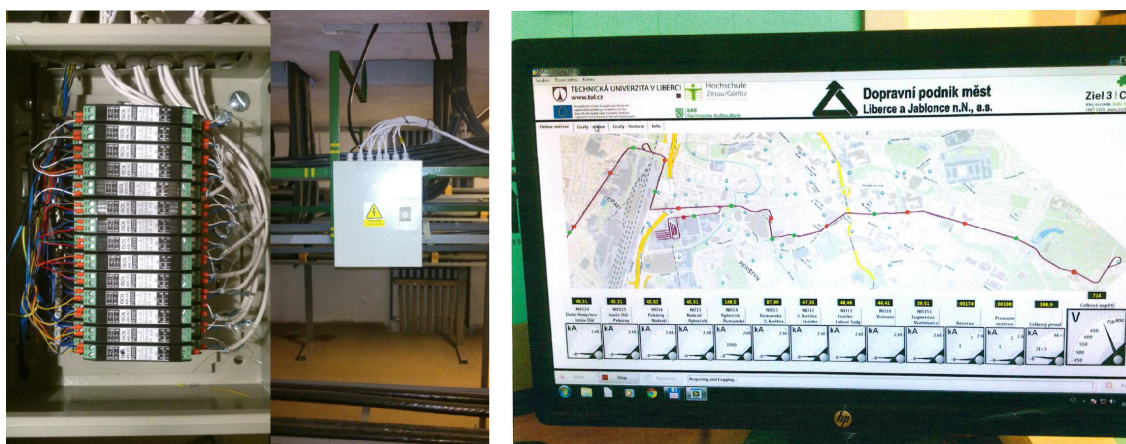
Jak již bylo zmíněno, tato mězírna při zahájení projektu nedisponovala žádným použitelným měřicím systémem se záznamem dat. Mězírna v ulici Tatranská je také generačně starší než mězírna v Dolním Hanychově. Stávající měření na mězírně před zahájením projektu dávalo pouze informaci o tom, zdali daným napájecím úsekem protéká proud a jestli není napájecí úsek přetěžován. Tento systém byl pro potřeby projektu zcela nevyhovující a nedostatečný, a proto bylo v rámci řešení projektu Ziel3 realizováno moderní měřicí zařízení.

**Nový měřicí systém** umí vizualizovat a archivovat velikosti proudů v jednotlivých napájených sekcích, velikost celkového proudu odcházejícího z mězírně a velikost napětí na troleji. Při návrhu měřicí stanice byly brány v potaz zejména požadavky na spolehlivost, bezpečnost, rychlost měření, přesnost měření, možnost snadné vizualizace i archivace dat a možnost fyzického umístění do prostor mězírně a napojení na stávající technologii. Základní blokové schéma návrhu nového měřicího zařízení včetně potřebných převodníků je na obrázku 4.8.



**Obrázek 4.8:** Základní princip měřicího systému

Jako optimální řešení byl vybrán koncept PC vybaveného měřicí kartou NI PCI-6281 M-Series, na kterém poběží HMI vizualizace a záznam dat v prostředí LabVIEW. Databáze je realizována programem PostgreSQL [72]. PC je připojen na záložní zdroj napájení, který poskytuje jak zálohu pro případ výpadku elektrické energie, tak i galvanické oddělení PC od rozvodné sítě měnirny. Galvanická oddělení všech prvků a jejich kvalitní stínění jsou nezbytná z důvodu odstranění poměrně vysokého rušení dané technologie. Měřicí systém je uložen ve vlastní skříni obsahující převodníky měřených signálů (včetně kabelových rozvodů). Celkem je použito 13 ks I–U převodníků a jeden U–U<sup>12</sup> převodník typu Rawet ISOL400. Vzorkovací perioda signálu je 0,1 ms. Signál je dále předzpracován funkcí RMS a převzorkován na 200 ms. V této periodě je pak signál zaznamenán i v databázi. Fyzická realizace převodníkové skříně a uživatelské prostředí jsou vyobrazeny na obr. 4.9.



**Obrázek 4.9:** Měřicí systém v měnirně v ulici Tatranská. *vlevo:* Realizace převodníkové skříně a její umístění v rozvodně. *vpravo:* Uživatelské prostředí pro sběr naměřených dat situované v řídicí místnosti.

<sup>12</sup> I–U proudovo–napěťový, U–U napětovo–napěťový převodník.

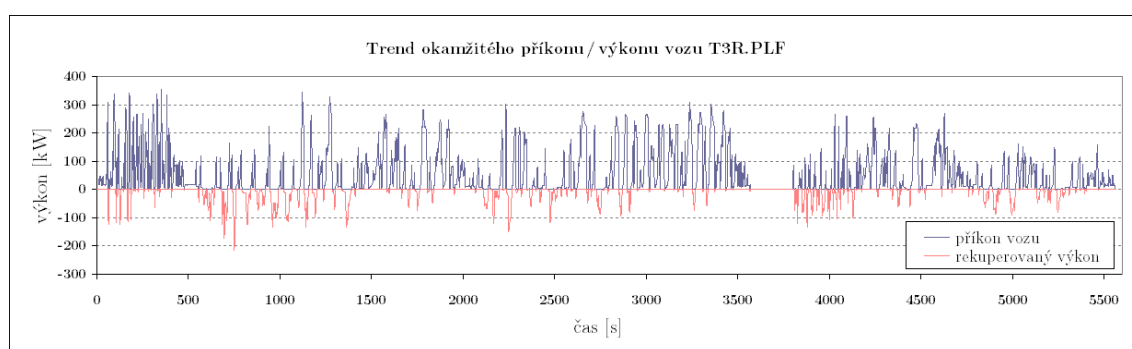
## 4.4 Energetická analýza naměřených dat

Důsledná analýza dat získaných z reálného provozu tramvaje i trakčních měření je nezbytnou součástí návrhu energetického úložiště. V této kapitole jsou analyzována data získaná měřeními, podrobně popsáním v předcházející oddílu 4.3.

### 4.4.1 Hodnocení dat z tramvajového vozu

Měření byla provedena v nočních hodinách, v době od půl druhé do půl čtvrté ráno, kdy v Liberci tramvaje nejezdí. Během měření tak mohl být na trati pouze jeden tramvajový vůz T3R.PLF. Měřicí okruh byl záměrně volen tak, aby pokryl trasu obou městských tramvajových linek č.2 a č.3 v obou směrech<sup>13</sup>.

Během měření vykazoval testovací vůz T3R.PLF trvalou spotřebu cca 1,25 kW<sup>14</sup>. V zimních měsících připadá významný díl celkové spotřeby elektrické energie na vytápění vozu. Maximální příkon vytápění salónu vozu je 18 kW<sup>15</sup>.



Obrázek 4.10: Výkonová bilance vozu na trati s vytápěním salónu 13,5 kW

Z dat zpracovaných a zobrazených na obr. 4.10 lze vyvodit tyto závěry. Při akceleraci dosahuje samotný vůz špičkového příkonu 320 kW. Vyšší odběr vozu již není možný bez ohledu na dynamiku jízdy a profil tratě, neboť při 300 kW dochází k elektronickému proudovému omezení v měniči trakční výzbroje. Nejvyšší rekuperační výkon trakční výzbroje TV Progress pak může dosáhnout cca 250 kW. Naměřených 220 kW odpovídá maximální hodnotě odevzdané do trakčního vedení, ponížené o příkon využitý na vytápění a trvalou spotřebu vozu. Střední hodnota odebíraného výkonu během celého jízdního cyklu byla 41,8 kW.

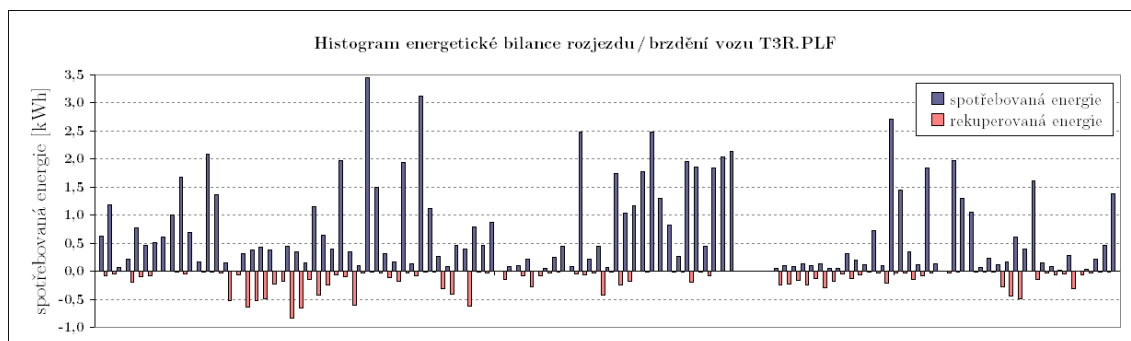
Obrázek 4.11 dává přehled o celkové energetické bilanci během střídajících se cyklů akcelerace (nebo jízdy konstantní rychlostí) a rekuperačního brzdění. Pro danou trať bylo naměřeno maximální množství rekuperované energie v jednom cyklu 0,83 kWh, spotřebované pak 3,45 kWh.

<sup>13</sup> Měření obsahuje i úseky, které vozy absolvují během manipulačních jízd z vozoven.

<sup>14</sup> Ta je způsobena zejména nucenou ventilací sériových trakčních elektromotorů řady TE022J a příslušné trakční výzbroje. Nezanedbatelnou položku tvoří i vnitřní a povinné vnější osvětlení vozu.

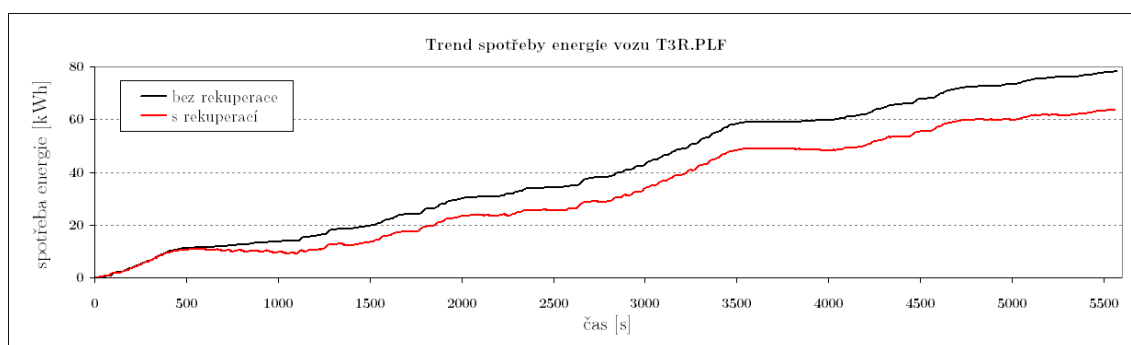
<sup>15</sup> Běžně nastavovaná hodnota je v místních podmínkách DPMLJ 12–14 kW.

Celkový poměr mezi spotřebovanou a rekuperovanou energií se tak pohybuje mezi  $1/5 - 1/4$ , tj. pouze cca 18–25 % z celkové energie je rekuperováno<sup>16</sup>.



**Obrázek 4.11:** Energetická bilance vozu na trati s vytápěním salónu 13,5 kW

Pro více vozů na trati není metodicky správné výkonové požadavky kalkulovat jako prostý násobek osamocенého vozu. Situace, kdy budou všechny vozy na trati akcelarovat ve stejný okamžik, není pravděpodobná. Naopak lze očekávat příznivější rozložení odebíraného výkonu v čase. Dále je třeba respektovat, že rekuperovaná energie navracená do trolejového vedení, je vždy přednostně spotřebovávána pro pokrytí rozjezdu jiného vozu. Pokud není na trati žádný vůz, nebo jiný spotřebič, který by dokázal rekuperovanou energii bezezbytku spotřebovat, je tato automaticky zmařena v brzděném rezistoru trakční výzbroje každého vozu. Toto následně vede opět k výhodnějšímu rozložení odebíraného výkonu z trakční měřiny v čase a zároveň snížení výkonových parametrů uvažovaného energetického úložiště. Pokud u osamocенého vozu počítáme s navracením 18–25 % energie, pak v případě sdílení energie mezi vozy<sup>17</sup>, zůstane k dispozici pro uložení v setrvačnicku již jen cca 7–12 %. Reálný provoz na tramvajové trati DPMLJ lze metodicky správně popsat pouze vyextrahováním úseků dat platných pro linku č.2 a č.3 v obou směrech<sup>18</sup> viz obr. 4.13.



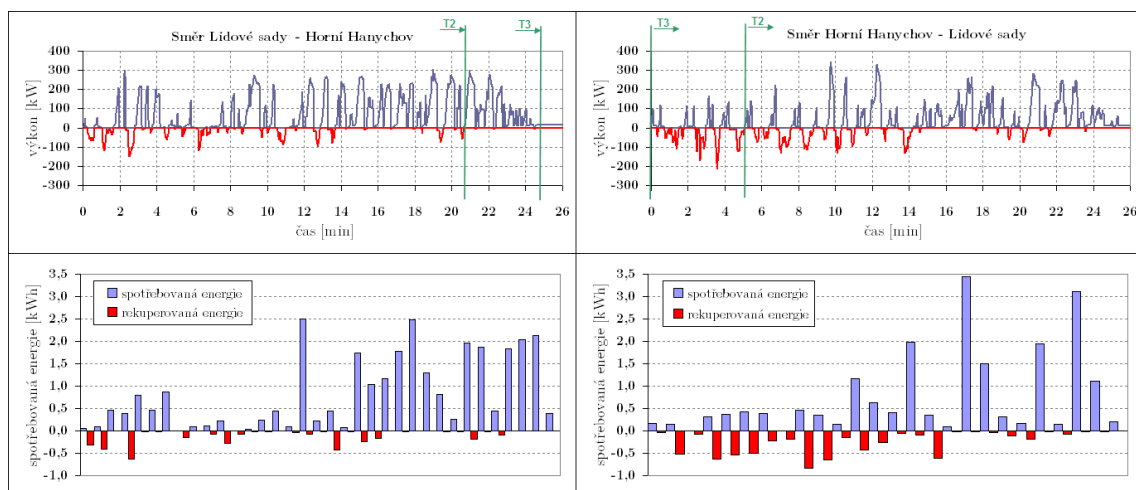
**Obrázek 4.12:** Trend spotřeby energie vozu s vytápěním salónu 13,5 kW

<sup>16</sup> Rozptyl hodnot kromě rozdílného stylu jízdy a aktuálního obsazení vozu tvoří zejména vytápění při zimním provozu.

<sup>17</sup> Při aktuální hustotě provozu na trati Horní Hanychov – Lidové sady.

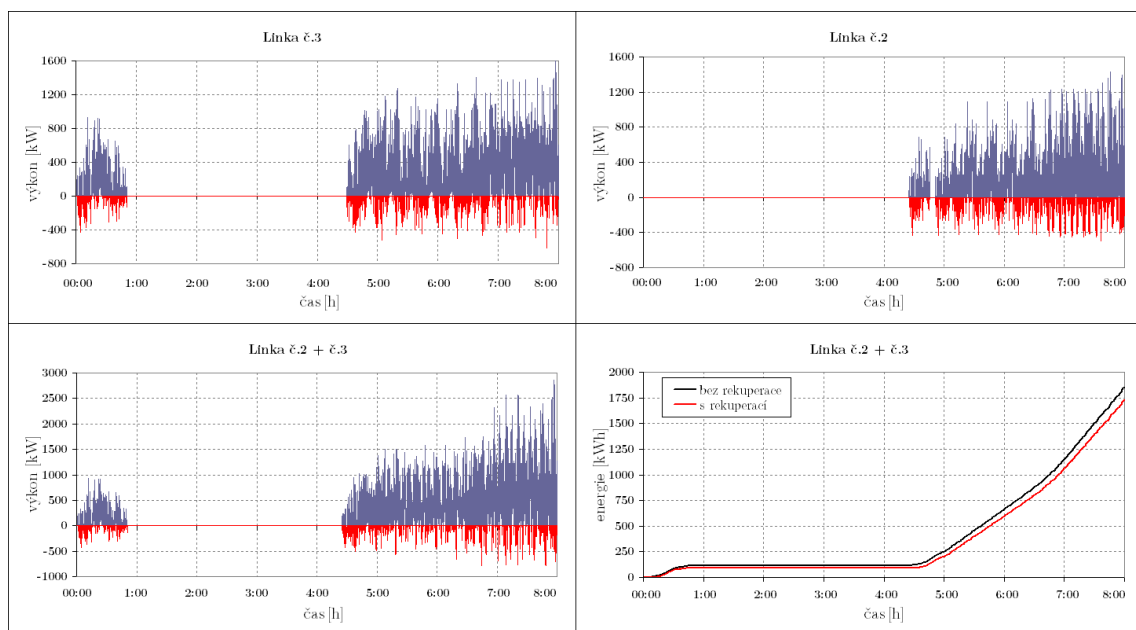
<sup>18</sup> Linku č.2 od linky č.3 odlišuje pouze její ukončení ve stanici Dolní Hanychov (standardní doba jízdy 21 min). Linka č.3 pokračuje až do stanice Horní Hanychov (standardní doba jízdy 26 min).





**Obrázek 4.13:** Bilance výkonů a histogramy spotřeby energie pro linky č.2 a č.3

Získané průběhy jednotlivých linek pak byly sestaveny dle jízdního řádu DPMLJ, platného od 31.8.2014, v jeden celek, ze kterého je možné popsat očekávané výkonové poměry v trolejovém vedení na trati Lidové sady – Horní Hanychov a zpět<sup>19</sup>.



**Obrázek 4.14:** Simulace provozu na trati s virtuálně propojenými napájecími úseky

Sledovaný ranní úsek mezi 0:00–8:00 h byl zvolen záměrně, protože je na něm možné demonstrovat všechny režimy dopravy. Zejména pak ranní špičku, která probíhá mezi 7:00–8:00 h, kdy je na trati maximální počet vozů. Konkrétně devět jízdních souprav, tvořených vždy dvěma vozy. Trend vlevo dole na obr. 4.14 poskytuje informaci, že špičkový odebíraný výkon pro 18 vozů nepřesahuje hodnotu 2800 kW. Teoretická hodnota pro všechny vozy akcelerující zároveň by pak byla cca 5400 kW.

<sup>19</sup> bez manipulačních jízd

Střední hodnota odebíraného výkonu pro běžný provoz se 14 vozy na trati pak vychází na 550 kW, pro dopravní špičku s 18 vozy 700 kW a pro režim omezení dopravy se 4 vozy pak 120 kW. Takto provedený rozbor výkonové a energetické bilance již poskytuje dobrou představu o velikosti a četnosti výkonových špiček, stejně tak jako střední hodnotě výkonu v rámci dané intenzity provozu na celé trati. Největším přínosem takto pojaté syntézy naměřených dat je možnost určit okamžitý rekuperovaný výkon, který v daném okamžiku nebyl spotřebován, a který tak bude uložen v energetickém úložišti. Měření v trakčních měnících DPMLJ se současným uspořádáním tato data nedokáže poskytnout.

Hlavní omezení takto provedeného rozboru tkví v tom, že jakékoliv opoždění jednotlivých vozů na trati, ať už vlivem zvýšené četnosti přepravovaných osob, či vlivem individuální dopravy, vede k odlišnému průběhu výkonových špiček. Teoreticky může nastat i mezní stav, kdy všechny vozy budou akcelarovat, nebo brzdít najednou<sup>20</sup>. V současné době jsou trakční měnírny, respektive jednotlivé vozy, na tyto extrémy připraveny a dokážou je absorbovat bez vzniku výjimečných stavů. I přesto navrhované energetické úložiště musí být rovněž vybaveno technickými prostředky, které se s takovými stavy dokáží vypořádat. Tento rozbor rovněž vychází ze situace, kde rekuperovaná energie je k dispozici v celém rozsahu trati. Tedy nebere v úvahu stávající technické řešení, kde trať je členěna na dva vzájemně oddělené úseky.

#### 4.4.2 Hodnocení dat z trakčních měření

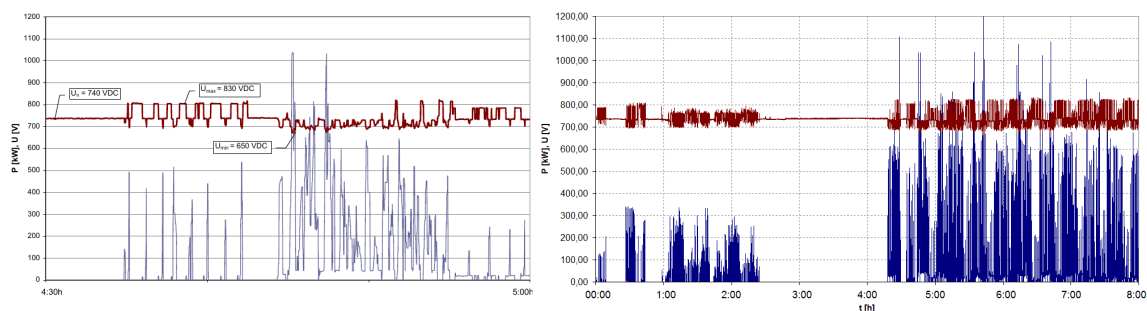
Výše uvedené rozdělení tramvajové sítě na několik napájecích úseků, respektive jejich napájení z více měření, technicky usnadňuje lokalizaci poruch, a v případě jejich výskytu je s výhodou využívána možnost nouzově daný úsek napájet z jiné měnirny. Dalším významným argumentem pro rozdělení tratě na více úseků je omezení úbytku napětí ve vedení na konci dlouhého úseku. Takovéto technické řešení trati ale neumožňuje maximálně využít rekuperované energie. V konkrétním případě DPMLJ linek č.2 a č.3 to znamená, že například vůz klesající ze stanice Lidové sady nemůže svým brzděním napájet vůz stoupající do stanice Horní Hanychov a naopak. Pokud by se v budoucnu zmíněné dva úseky propojily, bylo by možné rekuperovanou energii distribuovat po celé trati, což by samo o sobě vedlo k dalším úsporám.

- **Měnírna v Dolním Hanychově**

Při srovnání průběhu ranní spotřeby trakční měnirny Dolní Hanychov na obrázku 4.15 s výsledným průběhem, vzešlým z analýzy dat z měření ve voze na obr. 4.14 lze poukázat na několik skutečností. Celkově nižší výkony dodávané měnirnou vycházejí z menšího počtu vozů v daném úseku. Maximální počet souprav, které se během dne na daném úseku Horní Hanychov – Staré Pekárny může vyskytovat jsou tři, tedy celkem šest vozů. Celkové množství rekuperované energie není možné z naměřených dat v měnirně zjistit. Nicméně z trendu napětí je velmi dobře patrné, že v tomto úseku dochází k intenzivnímu maření energie. Instalace energetického úložiště v tomto úseku tak povede k významným úsporám.

<sup>20</sup> Dlouhodobá měření potvrzují, že k tomuto stavu běžně nedochází.





**Obrázek 4.15:** Data získaná z měřírny v Dolním Hanychově

Graf na obr. 4.15 zobrazuje vybraná data z měřírny v Dolním Hanychově. Na výřezu vlevo, zobrazuje detail 30 min ranního náběhu provozu mezi 4:30–5:00 h. Zde lze názorně odečíst nominální napětí naprázdno  $U_n = 740$  V, pokles napětí při vysokém zatížení až k  $U_{min} = 650$  V a četnost úseků s  $U_{max} = 830$  V, ve kterých při současné technologii napájení tratě, dochází k maření rekuperované energie.

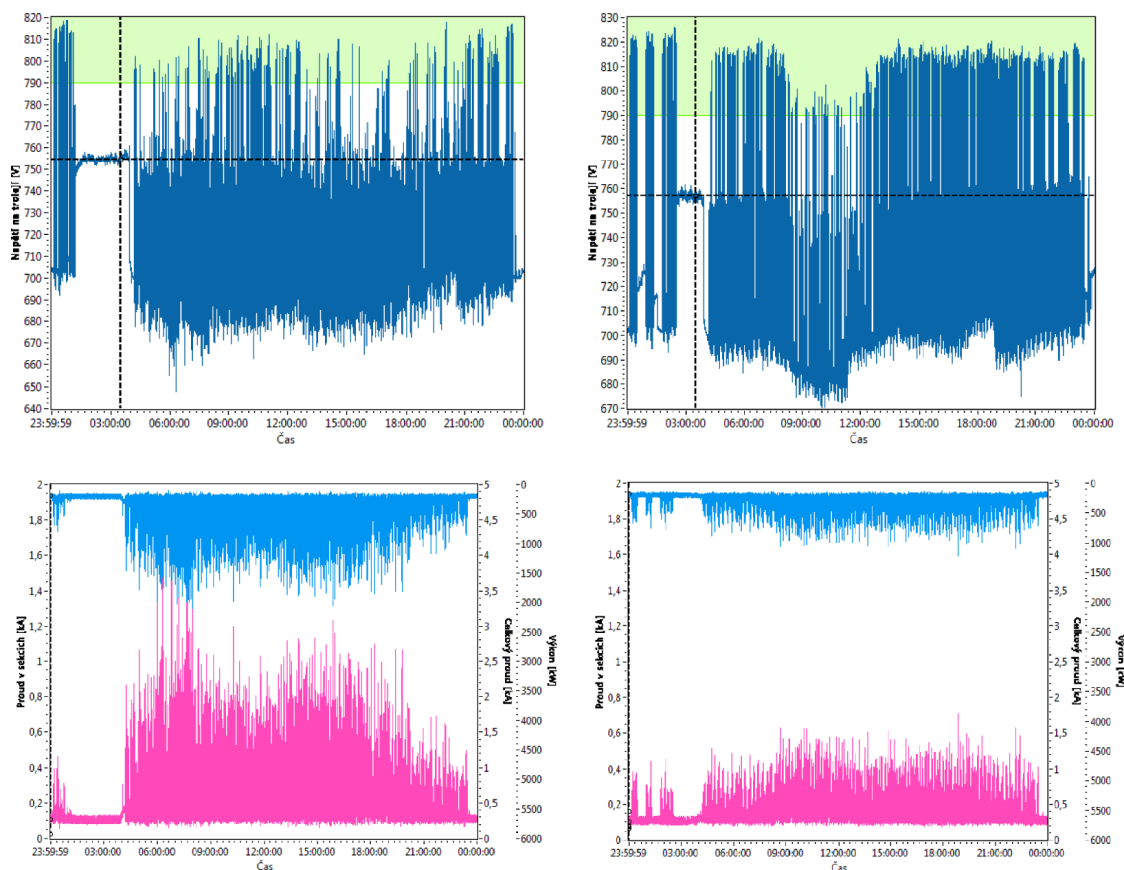
Z analýzy dat této měřírny, získávaných nepřetržitě dlouhodobým měřením po dobu více než jednoho roku měření plyne, že špičkový odebíraný výkon v úseku nikdy nepřekročil hodnotu 1400 kW. Střední hodnota dodávaného výkonu pro šest vozů v úseku 4:30–8:00 h je 360 kW.

#### • Měřírna v ulici Tatranská

Grafy zobrazují trendy dodávaného napětí a proudu z měřírny v ulici Tatranská ve všední den (na obr. 4.16 vlevo) a o víkendovém omezeném provozu (na obr. 4.16 vpravo) jsou navíc doplněny o průběh aktuální energetické bilance<sup>21</sup>. Maximální odebíraný proud, respektive dodávaný výkon do trolejového vedení je ve všední dny pod 3,5 kA, resp. 2400 kW, o víkendech pak pod 1,8 kA, resp. 1200 kW. V úseku se může vyskytovat najednou až šest souprav, čili dvanáct vozů. Trend průběhu proudu, resp. výkonu odpovídá analýze dat z měření ve voze viz obr. 4.14 úměrně snížené o menší počet vozů v úseku. Naměřená data dále umožní provést celkový bilanční výpočet elektrického výkonu/příkonu.

Ve všední den se celková spotřeba energie v úseku pohybuje v rozmezí 8,5–10,5 MWh, o víkendech a svátcích pak 6,0–7,5 MWh. Víkendový pokles je dán nižším počtem vozů na trati. Na druhou stranu není pokles tak výrazný proto, že se značně zvýší doba, po kterou tramvaje energii spalují v odporech a nedochází tak k rekuperaci mezi jednotlivými soupravami na trati. Tyto výsledky lze validovat proti naměřené celkové spotřebě za minulé měsíce a roky (viz příloha E), jejichž zpětnou analýzou lze dojít k obdobným denním spotřebám. Z průběhů na uvedených grafech je jasně patrný rozdíl mezi silným a slabým provozem (množství tramvají na trati) a dále pak okamžiky rekuperace mezi jednotlivými soupravami i okamžiky, kdy dochází k maření energie.

<sup>21</sup> Pouze spotřebovaná část energie bez rekuperace.



**Obrázek 4.16:** Data z měřirny v ulici Tatranská. *vlevo*: Průběhy  $U$  (tmavě modrá),  $I_{celk}$  (ružová),  $P$  (světle modrá) ze všedního dne 29.10.2014, *vpravo*: Průběhy  $U$ ,  $I_{celk}$ ,  $P$  z víkendového provozu

Napětí naprázdno  $U_n = 760$  V, pokles napětí při vysokém zatížení na  $U_{min} = 650$  V. Momentálně nevyužitá energie, která se spaluje v odpornících trakční výzbroje tramvajů je signalizována překročením napětí  $U_{max} = 800$  V. Během všedního dne se v součtu jedná o 30–70 min, o víkendech a svátcích pak o 50–120 min. Zároveň je možné vysledovat, že elektrická energie se přelévá mezi jednotlivými úseky, tedy tramvaje využívají stávající infrastrukturu pro rekuperaci. Tento okamžik je signalizován zvýšením napětí nad úroveň zatížené troleje  $U_z = 700$  V a zároveň setrvání v oblasti pod hodnotou  $U_{max} = 800$  V.

## 4.5 Statistické údaje tramvajového provozu

Toto hodnocení vychází z rozboru situace tramvajového provozu Dopravního podniku měst Liberce a Jablonce nad Nisou. V příloze E je grafické zobrazení měsíčních odběrů trakční energie celého provozu DPMLJ<sup>22</sup> od roku 2009 až do října roku 2014. V březnu 2014 došlo k výluce na jablonecké trati a od tohoto měsíce jednotlivé měsíční odběry trakční energie ukazují pouze hodnoty sledované tramvajové linky Horní Hanychov – Lidové sady. Sběr dat realizovaný v rámci projektu Ziel3 na měnící v ulici Tatranská měří pouze energii v úseku Lidové sady – Viadukt.

### Celkový přehled:

- Celková spotřeba trakční energie provozu DPMLJ v roce 2013 činila 6739 MWh.
- V době řešení projektu k 31. 10. 2014 byla celková spotřeba trakční energie od začátku roku 3056,5 MWh a bylo zaplacen 7,1511 miliónů Kč.
- Za 10 měsíců (březen–říjen) byla na sledovaném úseku Horní Hanychov – Lidové sady celková spotřeba trakční energie 1730 MWh. Za celý rok 2014 je pro daný úsek odhadovaná spotřeba 2400–2500 MWh<sup>23</sup>.
- Za rok 2014 byla průměrná cena 2,34 Kč/kWh. Tato částka, vysoutěžená na energetické burze, je podstatně nižší než běžná cena pro velkoobdobě.

### Dílčí energetické poměry:

- Průměrná spotřeba nového typu jedné tramvaje s rekuperací je 2,7 kWh km<sup>-1</sup>.
- Průměrná spotřeba starého typu jedné tramvaje bez rekuperace je 4,5 kWh km<sup>-1</sup>.
- V dlouhodobém průměru je 15 % energie rekuperováno, krátkodobě až 30 %.
- V zimním období (listopad–únor) narůstá spotřeba o 30 % kvůli vytápění provozu.

### Poměry v měnící v ulici Tatranská:

- Trvalý klidový odběr měnící na lince je přibližně 15–25 kW v závislosti na sezóně, zejména pak na klimatických podmínkách.
- Z dlouhodobých měření vychází doba, kdy je potřeba přebytečnou energii rekovat v poměrně širokém rozsahu 15–140 min.
- Denní průměr energie k rekuperaci vychází za rok 2014 na cca 160 kWh.
- Dále je nutné zmínit energetické poměry na nejvzdálenějších bodech trolejového napájení, které jsou ve směru ke konečné stanici v Lidových sadech. Ve dvou různých obdobích byla provedena měření při rozjezdech na jedné tramvaji.
- Analýza poukazuje na značné ztráty ve vedení v tomto úseku díky  $R_v = 0,3\text{--}0,45\ \Omega$ .
- Poměr ztrátového výkonu ve vedení k příkonu tramvaje při rozjezdu je cca 20–30 %.

<sup>22</sup> Včetně provozu na trati do Jablonce nad Nisou.

<sup>23</sup> Uvedené odběry trakční energie v sobě zahrnují i energii spotřebovanou pro vlastní provoz měnící.

## 4.6 Zhodnocení výsledků

Z výsledků získaných v této kapitole je možné vyslovit tyto závěry. Byla provedena měření jak na osamoceném voze, tak v obou trakčních měnících na tramvajové trati. Každý vůz je na dané trati schopen pomocí rekuperačního brzdění navrátit zpět do společného trolejového vedení (dle ročního období a stylu jízdy) cca 18–25 % energie. V současné době není možné takto získanou energii vracet zpět do veřejné rozvodné sítě, a tudíž je hledáno řešení, jak přebytečnou energii efektivně využít v uzavřeném okruhu trolejového vedení. Nabízejí se zejména tyto dvě metody:

**1) Propojení napájecích úseků.** Již za stávajících podmínek probíhá v případě, že je na trati více vozů, vzájemné přelévání energie mezi rekuperujícími a akcelerujícími vozy. Teprve pokud není na trati jiný vůz, je energie mařena v trakční výzbroji jednotlivých vozů. V případě, že by byly v budoucnu oba úseky propojeny, snížilo by se množství nevyužité energie zhruba na 7–12 %.

**2) Instalace přechodného úložiště energie.** Pro maximální využití rekuperované energie bez propojení úseků je třeba uvažovat o instalaci minimálně dvou energetických úložišť<sup>24</sup>. Z analýzy dat z obou trakčních měření plyne, že zejména v úseku Horní Hanychov – Staré Pekárny, který zajišťuje měnící v Dolním Hanychově, je v současné době mařeno značné množství energie. Toto je způsobeno menším počtem zastávek a tedy i vozů v úseku, kde navíc vozy linky č.2 končí již ve stanici Dolní Hanychov. Zanedbat nelze ani významné stoupání trati v tomto úseku. Naopak v úseku Lidové sady – Staré Pekárny, napájené z měnící v ulici Tatranská, je provoz intenzivnější (až 12 vozů). I z tohoto důvodu dochází za plného provozu ke znatelně lepšímu využití rekuperované energie. Na záznamech z omezeného provozu a o víkendech je pak již opět patrné významné množství mařené energie.

Na základě provedené analýzy dat lze doporučit takový typ ESS, které bude disponovat velmi vysokým výkonem při relativně malém množství uložené energie. Vzhledem k průměrnému množství denní rekuperované energie 160 kWh a četnosti vzájemného překrývání cyklů akcelerace vozu, lze doporučit jako optimální hodnotu využitelné energie 5 kWh. Trvalý nabíjecí a vybíjecí výkon pak 1000 kW s možností krátkodobého přetížení na dvojnásobek. Tato hodnota umožní snížit špičkový příkon obou měnících o polovinu. Tedy z max. instalované hodnoty 2200 kVA na 1100 kVA.

**Tabulka 4.2:** Požadavky kladené na ESS

parametr	hodnota
trvalý nabíjecí/ vybíjecí výkon <sup>a</sup>	1000 kW
množství uložené energie	5 kWh

<sup>a</sup> S možností krátkodobého přetížení

<sup>24</sup> Jedno pro každý úsek, přičemž tyto úložiště nemusí být výkonově, resp. energeticky stejné.

## 5 Aplikace energetických úložišť v městské tramvajové trakci

### 5.1 Technologie energetických úložišť

Technologie současných úložišť energie, ať už jsou založeny na setrvačnicku (FESS), superkapacitorech (SCESS) nebo lithiových bateriích (BESS), stále nedisponuje takovými vlastnostmi, které by umožnily vyřešení optimálního ESS. Mezi kritické vlastnosti patří zejména specifická hustota výkonu a uložené energie, komplexní životnost technologie a samozřejmě cena. Pro vzájemné porovnání vybraných vlastností dané technologie slouží následující tabulka 5.1.

**Tabulka 5.1:** Přehled vybraných technologií ESS

technologie <sup>a,e</sup>	parametry ESS					
	spec. energie [Wh l <sup>-1</sup> ]	spec. výkon [W l <sup>-1</sup> ]	cyklická <sup>b</sup> životnost [-]	kalendářní <sup>c</sup> životnost [let]	cena <sup>d</sup> energie [\$/kWh]	cena výkonu [\$/kW]
BESS NMC–C	150	150	2000	10–15	350	350
BESS LFP–C	80	160	4000	10–15	500	250
BESS LMO–LTO	60	600	20 000	20	600	60
SCESS	1	800	1 mil.	10	50 000	16
FESS LowSpeed	4	1000	1 mil.	20	2500	350

<sup>a</sup> V tabulce jsou uvedeny parametry technologie ESS (vč. elektronického i teplotního managementu, odpojovačů a instalační krabice, resp. rozvaděče) bez přizpůsobovacího DC–DC měniče

<sup>b</sup> Pro BESS platí hodnoty při 80 % DoD, pro SCESS při vybíjení do  $\frac{1}{2}U_{nom}$  (75 % DoD) při poklesu kapacity na 70 % původní kapacity a nárůstu ESR o 100 % [73]

<sup>c</sup> Jedná se o minimální životnost při provozu nebo skladování při jmenovitých podmínkách

<sup>d</sup> Ceny jsou uvedeny bez DPH

<sup>e</sup> Zdroje dat jsou materiály společností: Tesla Motors, Inc.; Altair Nanotechnologies, Inc.; A123 Systems, LLC.; Sony Corp.; Maxwell Technologies, Inc. a Piller Group GmbH

Z daného srovnání parametrů tří moderních technologií BESS, SCESS a nízkootáčkových FESS je patrné, že žádná z posuzovaných technologií nenabízí optimálně vyvážené vlastnosti. Nicméně zároveň je dobré poukázat na skutečnost, že ne všechny vlastnosti musí mít v případě návrhu konkrétního ESS stejnou váhu.

Zejména pak gravimetrická hustota energie i výkonu moderních technologií úložišť je již dlouhodobě na uspokojivé úrovni a není tak signifikantní překážkou pro realizaci kolejových, ale i silničních vozidel závislé i nezávislé trakce<sup>1</sup>. Tato dnes zůstává klíčovým problémem pouze pro leteckou techniku a aplikace, kde je ESS nesen člověkem. Z tohoto důvodu není v přehledu vůbec uvažována. Největší technologickou překážkou realizace optimálního ESS tak dodnes zůstává volumetrická hustota energie. Nedostatkem volného instalačního prostoru trpí především zcela nízkopodlažní vozy kolejové i silniční hromadné přepravy. Zde lze obvykle umístit ESS pouze na střechu vozidla, která však již bývá z větší části obsazena trakční výzbrojí. V tomto ohledu tak mají značnou výhodu stacionární ESS.

Kalendářní životnost současných technologií BESS a SCESS je dnes již na dobré úrovni, ovšem pouze za předpokladu kvalitního termálního managementu<sup>2</sup>. Cyklická životnost SCESS je v podstatě nekonečná. Pro FESS to platí také, ale pouze za předpokladu kontinuálního provozu bez častých odstávek. Cyklickou životnost všech technologií BESS lze až řádově prodloužit využíváním nižších hodnot DoD<sup>3</sup>.

### 5.1.1 Mobilní nebo stacionární varianta

V obecné rovině vychází jako nejefektivnější řešení pro maximální využití rekupe- rované energie instalace mobilních ESS ve všech vozidlech na trati. Jedině takto lze totiž eliminovat vliv ztrát obousměrného přenosu energie ve vedení, které tvoří nezanedbatelnou položku energetické bilance trolejového napájení. Bohužel v praxi jde obvykle o značně komplikované řešení, a to nejen kvůli výše zmíněným omeze- ným parametrům současných ESS. Problémy představuje zejména dodatečné řešení instalace zařízení do zavedených typů vozů. Dalším omezujícím prvkem návrhu mo- bilního ESS bývá profil dané trati. Mobilní ESS je vhodné zejména pro převážně rovinné trati, kde se potřebné úložiště energie minimalizuje na pojmnutí brzdné ener- gie ze zastavení, respektive omezení výkonové špičky při rozjezdu. Pokud se však v profilu tratě vyskytují dlouhé úseky klesání, je potřeba pro plné využití brzdné energie do vozu instalovat někdy i násobně větší kapacitu. To navyšuje požadavky na volný instalační objem pro ESS a zvyšuje hmotnost vozidla. Pokud je pak vozidlo nasazováno univerzálně i pro jiné úseky trati, nebude pak instalovaná energie v mo- bilním ESS v konečném důsledku optimálně využita. Typickým příkladem je právě linka č.3 DPMLJ, jejíž výškový profil je zobrazen na obr. 4.1. Pro místní podmínky lze tak jednoznačně doporučit realizaci stacionárního úložiště energie.

<sup>1</sup> Gravimetrická hustota energie sériově produkovaných BESS pro silniční a kolejová vozidla se pohy- buje v rozmezí 80–160 Wh kg<sup>-1</sup>. To znamená, že ESS pro uložení celodenní produkce rekuperované energie 160 kWh na daném úseku tratě DPMLJ, může vážit 1–2 t, což umožňuje vedení celého úlo- žiště pouze jedním vozem T3R.PLF. Osobnímu BEV s 160 kWh baterií pro dojezd 800 km NEDC odpovídá pohotovostní hmotnost cca 3 t a tedy stále vyhovuje požadavkům kategorie M1.

<sup>2</sup> U SCESS každé zvýšení teploty o 10 °C nad  $t_n = 25$  °C snižuje cyklickou životnost o 10 % a skla- dovací o polovinu [73]. U BESS, nabíjených při <0 °C, působí jev, při kterém dochází k vylučování lithia z lithných iontů, které se neinterkalovaly do aktivního materiálu anody a jeho ukládání v ko- vové formě na jejím povrchu. Tím se zmenšuje její aktivní plocha a v krajním případě může tato vrstva způsobit vnitřní zkrat. Pouze technologie Li-S a články s LTO anodou tímto jevem netrpí.

<sup>3</sup> Společnost Altairnano pro své LMO–LTO články udává až 1 mil. cyklů při 10 % DoD [74].

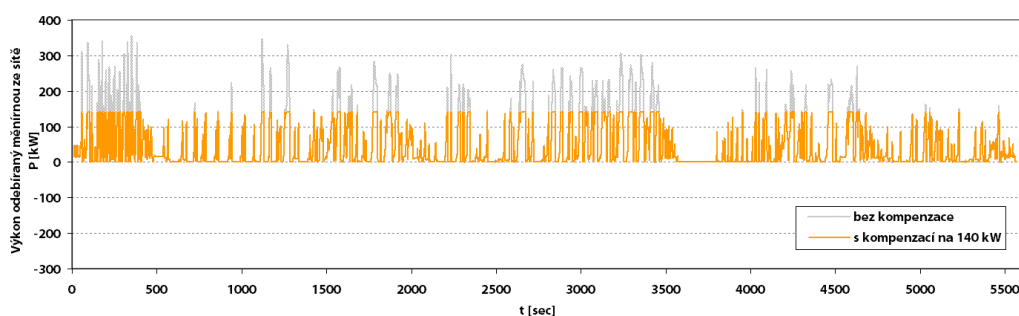
## 5.2 Provozní režim úložiště pro místní podmínky

Kromě primárního cíle požadujícího plné využití rekuperované energie jsou na energetická úložiště často kladeny i další požadavky. Mezi ně patří požadavek na snížení celkového proudového namáhání trakční měničny z pohledu rozvodné energetické sítě. V ideálním případě pak kompletnímu vyhlazení průběhu odebíraného proudu. Pro omezení proudových špiček, vznikajících přímo v trolejovém vedení, je třeba instalovat mobilní energetické úložiště přímo do všech vozů na trati. Nicméně k potlačení tohoto problému může přispět i decentralizovaná koncepce stacionárního úložiště, kdy ke každému úseku trakčního vedení náleží samostatný modul energetického úložiště. Pokud není realizace decentralizované koncepce úložiště možná, je vždy výhodné umístit centralizované úložiště energie do nejvzdálenější části trakčního úseku ve směru od měčny. Právě zde může zajišťovat další podpůrnou funkci v podobě kompenzace úbytku napětí v dlouhém úseku trolejového vedení.

V následujícím textu jsou popsány dvě základní metody využití ESS. Tyto metody jsou obecně platné pro všechny provozní závislé městské trakce. Princip metod je demonstrován na reálných datech provozu tramvajového vozu T3R.PLF v Liberci.

### 5.2.1 Metoda omezující akcelerační špičky provozu pouze pomocí energie získané rekuperací

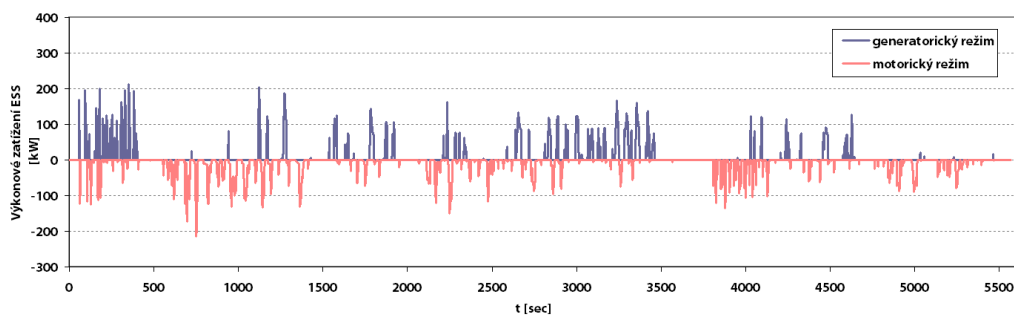
Z obr. 5.1 je názorně vidět, že pouze s využitím rekuperované energie lze významným způsobem snížit proudové špičky odebírané trakční měčnou z rozvodné sítě. V tomto konkrétním případě až o polovinu, tedy na cca 140 kW z původních 350 kW. Z obr. 5.2 a 5.3 dále plynou potřebné výkonové parametry pro dimenzování požadovaného výkonu ESS (zde cca 220 kW špičkově), tak i potřebnou zásobu elektrické energie v úložišti<sup>4</sup>. Pro lepší kompenzaci takto získaná energie již nestačí a bylo by nutné významným způsobem navyšovat množství energie v úložišti. Také v případě extrémních provozních stavů nemusí být tato metoda schopna zajistit požadovanou kompenzaci. K úplnému proudovému vyhlazení lze dospět pouze kontinuálním dobíjením ESS.



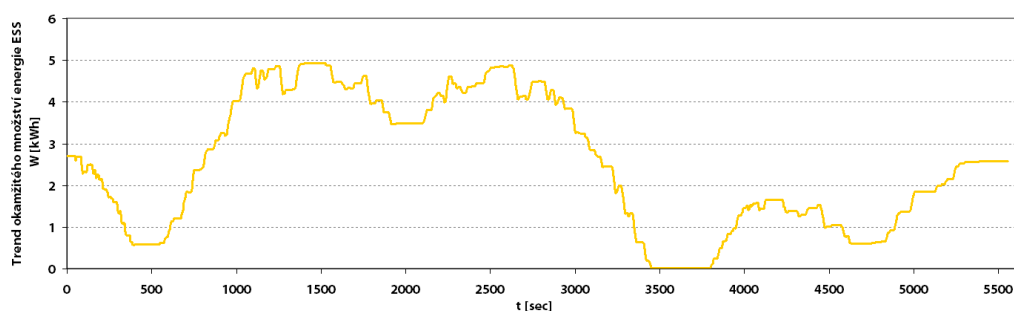
Obrázek 5.1: Okamžitý průběh výkonu odebíraného trakční měčnou ze sítě

<sup>4</sup> Zde cca 5 kWh bez započítání ztrát v ESS a ve vedení.





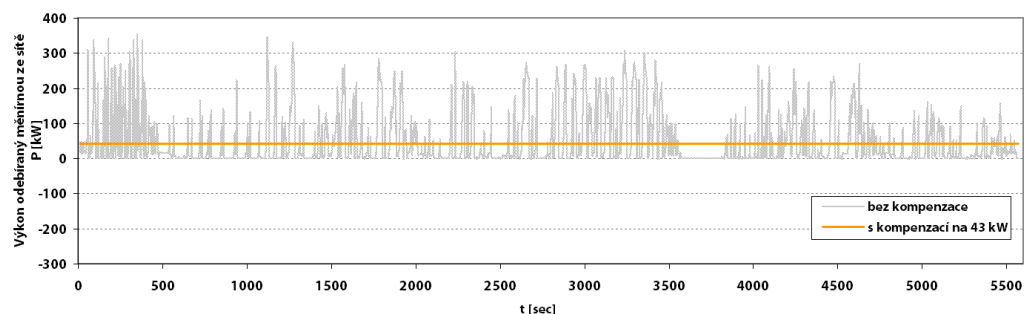
Obrázek 5.2: Okamžitý výkon ESS při kompenzaci na 140 kW



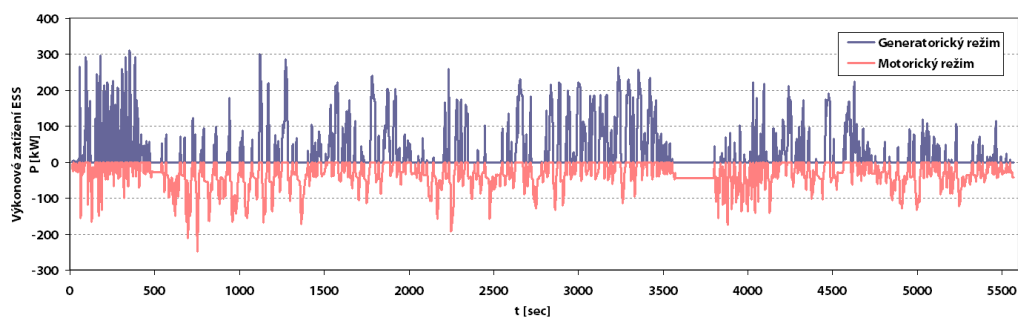
Obrázek 5.3: Zobrazení průběhu aktuálního množství energie uložené v ESS

### 5.2.2 Metoda udržující odběr provozu na definované hodnotě pomocí kontinuálního dobíjení úložiště

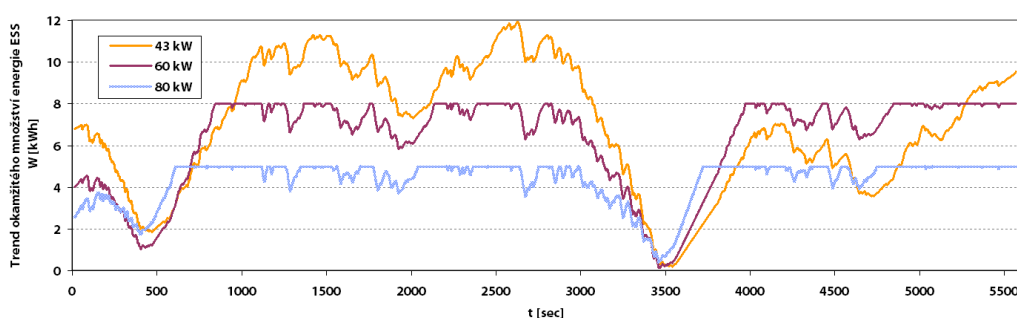
Tato metoda již dokáže vyhladit a minimalizovat proud odebíraný trakční měnírnou z rozvodné sítě až na střední hodnotu. Na druhou stranu právě s minimalizováním proudu odebíraného měnírnou dochází i k minimalizaci možného dobíjecího proudu. To způsobuje negativní efekt v podobě nutnosti navýšení potřebné kapacity ESS. V tomto konkrétním případě pro kompenzaci odběru měnírny na střední hodnotu příkonu 43 kW je třeba úložiště disponující cca 12 kWh energie. Z tohoto důvodu je vhodné zvážit ekonomický přínos pouze částečné kompenzace, kdy pro odběr měnírny 60 kW je potřeba již jen 8 kWh úložiště, pro 80 kW pak 5 kWh.



Obrázek 5.4: Okamžitý průběh výkonu odebíraného trakční měnírnou ze sítě



Obrázek 5.5: Okamžitý výkon ESS při kompenzaci na 43 kW



Obrázek 5.6: Zobrazení průběhu aktuálního množství energie uložené v ESS

### 5.3 Volba technologie úložiště a jeho umístění

Dle stanovených požadavků lze pro podmínky DPLMJ doporučit právě nízkootáčkové FESS. Tato technologie stále nabízí nejvyšší robustnost, která se projevuje jak v praktické nezávislosti provozních parametrů, tak zejména životnosti technologie, na teplotě okolí. Masivní nasazení technologie SCESS dlouhodobě omezuje především extrémní cena za instalovanou kWh spolu s nutností vždy použít stejně výkonově odpovídající DC–DC měnič<sup>5</sup>. Technologie BESS také vyžaduje DC–DC měnič a navíc pro splnění výkonových požadavků vyžaduje značné předdimenzování úložiště 100–500 kWh. To se ale vzhledem k aktuální ceně za kWh technologie nejvíce jeví jako zásadní problém, pokud je zde jiná možnost pro využití kapacity úložiště.

Z hlediska umístění úložiště najde ESS největší uplatnění v úseku měnárny v ulici Tatranská. Tato napájí část tratě s menším převýšením, ale s větší hustotou provozu a kratšími úseky mezi zastávkami. Zároveň je zde značný počet špiček rekuperované energie z brzdění v zastávkách, ale i na semaforech při průjezdech křižovatek. Dalším významným argumentem pro umístění ESS v tomto úseku je omezení úbytku napětí ve vedení. Ztráty energie na vedení zde dosahují až 30 % energie potřebné k akceleraci vozu. Pro částečné omezení ztrát ve vedení, je vhodné umístit ESS v Lidových sadech, tj. na nejvzdálenějším místě od měnárny.

<sup>5</sup> Měnič je nezbytný jak pro využití plné kapacity SCESS tak pro řízení jeho dobíjení. Tím je ovšem dále navýšena cena technologie o 200–400 \$/kW.

## 6 Návrh energetického úložiště na bázi setrvačnicku

V této kapitole je uveden můj přínos k návrhu technologie energetického úložiště na bázi setrvačnicku (FESS) v rámci projektu Ziel3. Jedná se o ideový návrh nízkootáčkového setrvačnicku a kompletní návrh motor–generátoru setrvačnicku spolu s implementací technologie do stávajícího provozu. Návrh uložení setrvačnicku pomocí aktivních magnetických ložisek (AMB). Stanovení specifických zatížení, návrh hřídele a vyvážení disku řešili kolegové z HS Zittau/Görlitz a jsou uvedeny v závěrečné zprávě projektu [94]. Vlastní design a parametry FESS jsou podřízeny provedené analýze dat z reálného tramvajového provozu DPMLJ, popsané v kapitole 4 a možností jeho nasazení, popsaných v kapitole 5.

### 6.1 Setrvačnický

Setrvačnick se řadí mezi kinetická úložiště energie<sup>1</sup> založená na principu rotujícího hmotného disku upevněného na hřídeli, který je na obou koncích uložen ve speciálních ložiscích. Na stejné hřídeli je obvykle instalován i elektrický motor–generátor, který zajišťuje obousměrný převod mezi kinetickou a elektrickou energií. Množství energie uložené v setrvačnicku je stanoveno dle následující rovnice

$$E_{K_{FESS}} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (6.1)$$

a tudíž lze kdykoliv velmi přesně stanovit okamžité SoC setrvačnicku i během zatížení. Z fyzikálního vztahu je rovněž zřejmé, že FESS lze realizovat dvěma přístupy. První je založen na velké hmotě rotujícího disku setrvačnicku, druhý pak na vysokých pracovních otáčkách. Oba přístupy byly v minulosti podrobně rozpracovány. Moderní FESS využívají aktivní magnetická ložiska (AMB) postavená na materiálech supravodivých za vysokých teplot (HTS). Setrvačnick tak v podstatě levituje v magnetickém poli. Pro možnost odstavení setrvačnicku a případ selhání magnetických ložisek je FESS vybaven i sadou mechanických ložisek.

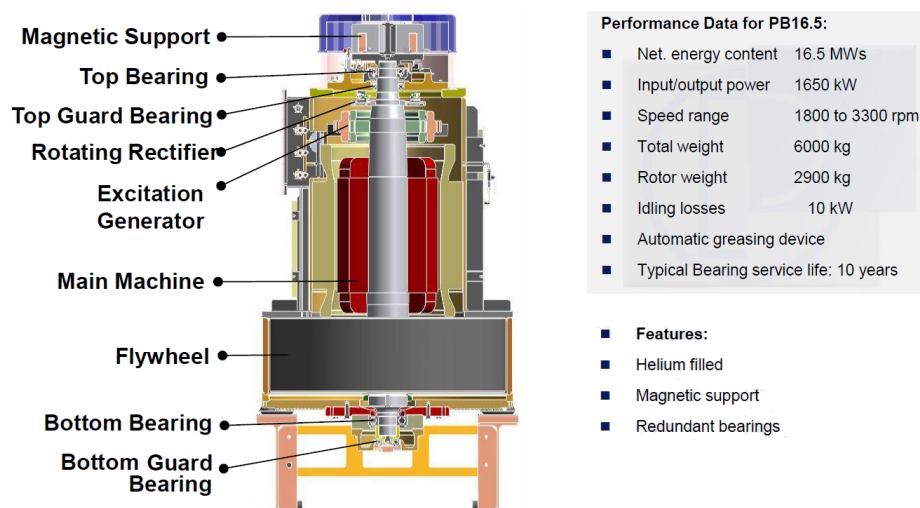
---

<sup>1</sup> V odborné literatuře se lze setkat s obecnou zkratkou KERS, zkratka FESS je používána pro soustrojí setrvačnicku a motor–generátoru, kde na vstupu i výstupu soustrojí je elektrická energie.

- **Vysokootáčkové FESS** obvykle pracují v oblasti od 10 000 ot.min<sup>-1</sup> výše, dosahují přitom zajímavé specifické hustoty výkonu i energie. Aby rotující disk zůstal kompaktní i při takto enormně vysokých obvodových rychlostech, používají se při jeho konstrukci vrstvené vláknité kompozitní materiály a nejnověji i pokročilé materiály na bázi uhlíkových nanotubic (CNT) s extrémní pevností. Výhoda vrstvených materiálů se projevuje i při havarijních stavech, kdy na rozdíl od homogenního materiálu nedochází k oddělování celých částí s kinetickou energií hmotného projektilu, ale k postupnému uvolňování vláken, která pak třením o nádobu působí rychlé zpomalení setrvačnicku. Vysoké obvodové rychlosti sebou nicméně přináší i vysoké ztráty působené třením o vzduch. V podstatě jediným technologickým řešením tohoto problému je uzavřít rotující setrvačnick v nádobě s vyčerpaným vzduchem. Realizace vlastní tlakové nádoby a vhodného generátoru vakua není technologicky problematická. Technicky obtížně řešitelný problém je ale utěsnění průchodu rotující hřídele ven z nádoby. Z tohoto důvodu bývá jak motor–generátor, tak i uložení setrvačnicku instalováno ve vakuu. Vzhledem k velmi omezeným možnostem odvodu ztrátového tepla z rotoru motor–generátoru<sup>2</sup>, je často jedinou možností použití PMSM se speciálně navrženým rotorem pro minimální ztráty ve svém magnetickém obvodu. Problém s chlazením se projevuje i u elementů AMB ložisek. V současné době je také problematické vyrábět vysokootáčkové FESS s vyšším výkonem než 300 kW, právě kvůli nutnosti použít PMSM.
- **Nízkootáčkové FESS** jsou obvykle provozovány do 3600 ot.min<sup>-1</sup>. Při těchto rychlostech jsou ztráty působené třením o vzduch ještě tak malé, že lze setrvačnick provozovat i ve vzduchu<sup>3</sup>. Díky tomu lze využívat běžné dvoupólové točivé stroje s jmenovitou frekvencí 60 Hz. Obecně nejvýhodnějším typem stroje pro motor–generátor setrvačnicku se jeví synchronní motor s cizím buzením (SepExPM) s bezkontaktním napájením rotorového elektromagnetu. Pro provoz setrvačnicku se SepExSM je pak výhodná i přítomnost tlumicího vinutí. Tou největší výhodou cize buzeného stroje je především možnost provozu s vysokou účinností při velmi nízkém zatížení. V mnoha typických aplikacích je FESS kontinuálně dobíjen ze sítě, respektive udržován na dané energetické hladině, relativně nízkým výkonem z důvodu omezení ztrát ve vedení. Tento obvykle bývá do 10 % jmenovitého výkonu motor–generátoru FESS. Při takto nízkém zatížení vykazují ostatní typy motor–generátorů cyklickou účinnost nejvýše 60 %. V ostatních případech cyklická účinnost setrvačnicku díky moderním pohonům dosahuje běžně více než 85 % [75]. Pro tento případ se tak často uvažuje o dvou samostatných strojích pro motorický režim a generátorický režim, nebo stroji se dvěma statorovými vinutími a sdíleným rotorem. Přitom vyšší hmotnost soustrojí zde není překážkou, neboť vysoká hmota setrvačnickového disku principiálně degraduje specifickou hustotu uložené energie a tedy primárně vede k stacionárnímu řešení ESS.

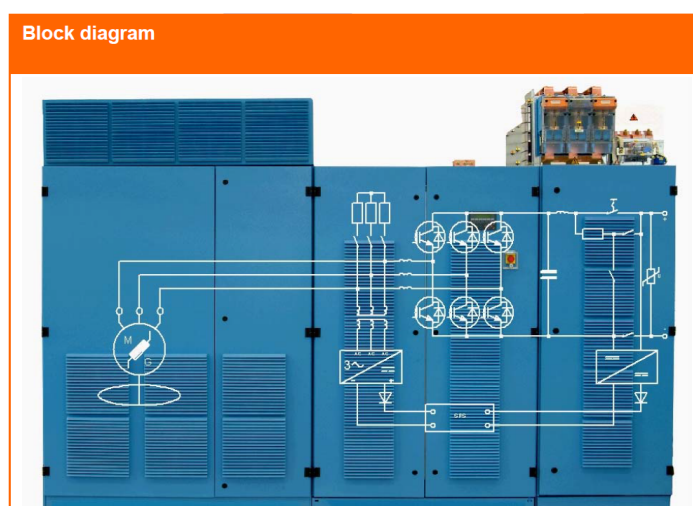
<sup>2</sup> Jediná tepelně vodivá cesta vede přes hřídel skrz záložní mechanická ložiska do pláště nádoby při odstaveném FESS. Během činnosti je tepelně vodivá cesta většinou zcela přerušena.

<sup>3</sup> Společnost Piller Group GmbH u svých nízkootáčkových FESS používá heliovou atmosféru [77].



Obrázek 6.1: Řez nízkootáčkovým FESS společnosti Piller Group GmbH [77]

Životnost FESS je v zásadě limitována pouze ložisky, které je třeba v určitém časovém intervalu servisovat. To ale platí pouze za předpokladu kontinuálního provozu. U přerušovaných provozů je sice možné setrvačnick úplně odstavit, ovšem časté roztáčení, zejména u hmotných setrvačnicků, má neblahý vliv na životnost systému uložení. Vlastní točivý stroj má životnost prakticky neomezenou, díky umístění jeho rotoru na společné hřídeli setrvačnicku, což umožňuje sdílet AMB ložiska. Technologie FESS také disponuje jednou zásadní výhodou proti BESS a SCESS. Vzhledem k tomu, že každý motor-generátor je vždy vybaven čtyř kvadrantovým měničem, je možné FESS kdykoliv zapojovat paralelně do společného DC meziobvodu ESS. Pro vybrané aplikace je možné přizpůsobit FESS pro přímé napojení do DC meziobvodu vlastní technologie i bez přizpůsobujícího DC–DC měniče<sup>4</sup>.



Obrázek 6.2: Schéma napojení FESS k dané technologii, resp. rozvodné síti [78]

<sup>4</sup> BESS a SCESS musí být vždy vybaveny DC-DC měničem, který navyšuje cenu o 300–500 \$/kW.

## 6.2 Projektování setrvačné hmoty

Cílem této části je navrhnout design, rozměry a vhodný materiál pro realizaci setrvačníku, který umožní skladování požadovaného množství energie v daném rozsahu provozních otáček viz tabulka 6.1.

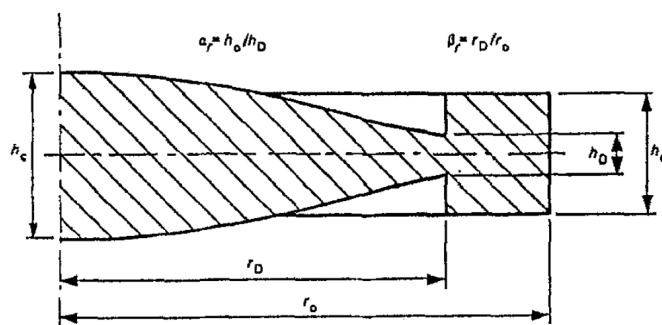
**Tabulka 6.1:** Požadavky kladené na FESS

parametr	hodnota
množství uložené energie	5 kWh
rozsah provozních otáček	1800–3600 ot. min <sup>-1</sup>

K dosažení optimálního návrhu setrvačné hmoty je třeba vycházet z některých obecných závislostí. Specifická hustota energie v rotoru  $W^M$  je omezena pouze otáčkami, při kterých dojde k trvalé deformaci materiálu. Tyto otáčky pak závisí pouze na designu rotující hmoty a vlastnostech materiálu, ze kterého je vyrobena,

$$W^M = K \frac{\sigma_p}{\rho_V} \quad (6.2)$$

kde  $K$  je bezrozměrný koeficient, který se skládá z tzv. faktoru tvaru a faktoru bezpečnosti pro danou rotující hmotu,  $\sigma_p$  je maximální přípustné normálové napětí a  $\rho_V$  je specifická hustota materiálu. Nejvyšší hodnoty  $K = 1$  dosahuje koeficient pro tzv. disk s rovnoměrně rozloženým napětím<sup>5</sup>. Tento tvar disku ale vede na nekonečně velký průměr a tedy není ve své ideální podobě prakticky realizovatelný. Proto se návrh upravuje na disk s rovnoměrně rozloženým napětím s obrubou viz obr. 6.3. Tento tvar již umožňuje technologickou realizovatelnost, nicméně zůstává zde další technologický problém v podobě napojení disku na hřídel motor–generátoru, respektive jeho uložení do AMB ložisek. Je možné využít dvou přístupů. První spočívá v připojení hřídele pomocí příruby a šroubových spojů. Druhý pak ve vytvoření unašeče disku s požadovaným otvorem, který musí být silnější než vlastní disk v tomto bodě [80]. Tím dojde k omezení namáhání disku v místě otvoru viz obr. 6.5.



**Obrázek 6.3:** Řez diskem setrvačníku s rovnoměrným napětím s obrubou [81]

<sup>5</sup> Jedná se monolitický disk z izotropního materiálu bez otvorů.



### 6.2.1 Výpočet geometrie setrvačné hmoty

Výpočet vnějšího profilu rotujícího disku daného parametrem  $h_{(r)}$  lze optimalizovat volbou koeficientů koeficient  $B$  a  $\beta_r$  kde:

$B$  - faktor pro ovlivňování geometrického faktoru a rychlostního faktoru<sup>6</sup>

$\beta_r$  - geometrický faktor ovlivňující výpočet axiální délky disku s obrubou

$h_c$  - axiální rozpínání disku v ose rotace

$r_0$  - maximální vnější průměr disku

$\alpha_r$  - poměr axiálního rozpínání věnce k  $h_c$

$\alpha_r$  - faktor pro určení směrnice obrysu  $h_{(r)}$  jako funkce poloměru

$$B = \frac{2\pi\rho r_0^3 h_0}{n m_b r_b} \quad (6.3)$$

$$\beta_r = \sqrt{\frac{2}{B\alpha_r} \left[ \alpha_r - 1 + \sqrt{\frac{\alpha_r^2 B (B - 2 + 2v)}{(1 - v)^2} + (\alpha_r + 1)^2 + \frac{2B^2 \alpha_r^2 \sigma_{r_0}}{\rho \omega^2 r_0^2 (1 - v)}} \right] - \frac{1 + v}{1 - v}} \quad (6.4)$$

Zde se objevuje parametr  $\sigma_{r_0}$  pro normálové napětí na poloměru  $r_0$ , ke kterému dochází dodatečným zatížením obruby hustotou  $\rho$ . Takové dodatečné zatížení je možné si představit například jako lopatkování turbíny<sup>7</sup>. Návrh profilu setrvačníku se pak provádí v závislosti na  $h_{(r)}$  a je rozdělen do 3 částí:

Pro  $r \leq \beta_r r_0$  platí:

$$h_{(r)} = h_c \left\{ e^{-\frac{B}{2} \left(\frac{r}{r_0}\right)^2} + (\alpha_r - 1) e^{-\frac{B}{2} \beta_r^2} \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \left( \frac{\frac{r}{r_0} - \beta_r}{\alpha_r} \right) \right] \right\} \quad (6.5)$$

Pro  $r \geq \beta_r r_0$  platí:

$$h_{(r)} = h_c e^{-\frac{B}{2} \beta_r^2} \left[ \frac{1 + \alpha_r}{2} + \left( \frac{\alpha_r - 1}{\pi \alpha_r} - B \beta_r \right) \left( \frac{r}{r_0} - \beta_r \right) \right] \quad (6.6)$$

Jestliže je dosaženo maximálního axiálního prodloužení podle rovnice (6.7), odvodí se věnec od  $r_0$  právě s tímto rozměrem.

$$h_{max} = \alpha_r h_c e^{-\frac{B}{2} \beta_r^2} \quad (6.7)$$

<sup>6</sup> Při zvýšení  $B$  je potřeba vyšší rychlost pro stejné množství energie.

<sup>7</sup> Tento člen se při návrhu disku s konstantním napětím bez obruby neuplatní.

### 6.2.2 Rozměry a design setrvačné hmoty

Pro navrhovaný setrvačník byly použity následující vstupní parametry:

$$h_c = 120 \text{ mm}$$

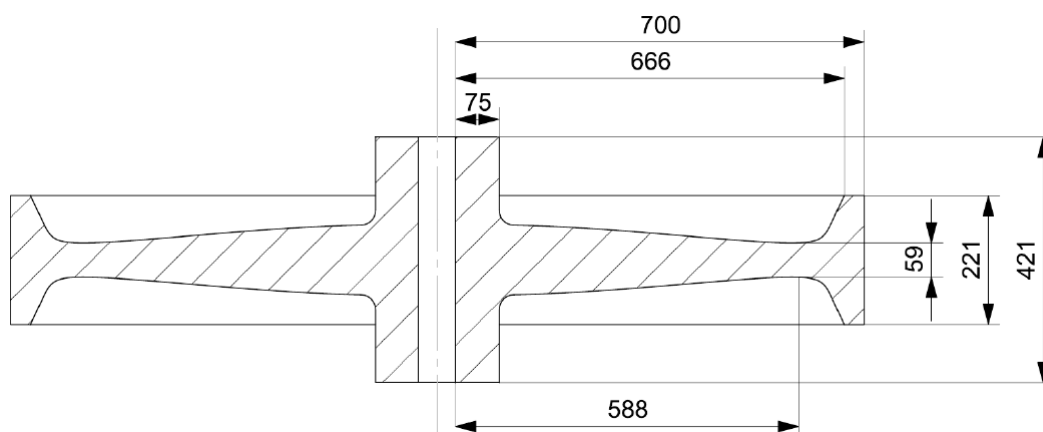
$$r_0 = 700 \text{ mm}$$

$$a_r = 0,02$$

$$\alpha_r = 6$$

$$B = 2,8$$

Řez diskem setrvačníku s konstantním napětím s obručou a unašečem, navrženým dle daných vstupních parametrů, je uveden na obrázku 6.4.



Obrázek 6.4: Řez diskem setrvačníku dle definovaných kritérií

Jako vhodný materiál byla vybrána ocel 42CrMo4. Geometrii setrvačníku pak odpovídá hmotnost 1245 kg a hmotnostní moment setrvačnosti<sup>8</sup> 324,5 kg m<sup>2</sup>. Na průchozí hřídel setrvačníku budou po obou stranách umístěny elementy pro AMB ložiska, včetně senzorů pro měření radiálního posunu hřídele. Specifická hmotnostní hustota energie samotného disku setrvačníku je 4 kWh kg<sup>-1</sup>. Po přičtení hmotnosti motor–generátoru, ochranného kontejneru a ostatních komponent FESS bude výsledná hmotnostní hustota energie méně než poloviční.

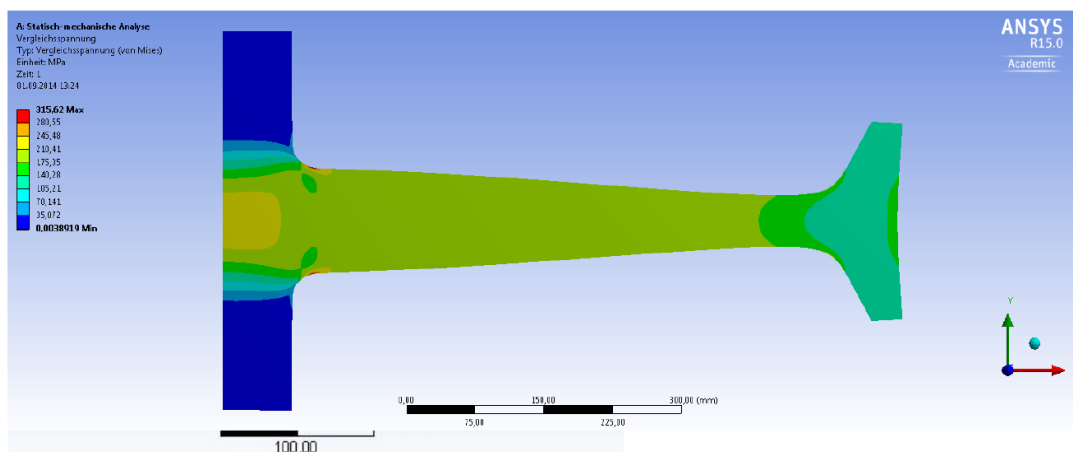
### 6.2.3 Pevnostní analýza setrvačné hmoty

Pro setrvačník z obrázku 6.4 byl v softwaru ANSYS vytvořen osově souměrný model a následně provedena pevnostní analýza při maximální rychlosti otáčení 3600 ot. min<sup>-1</sup>. Výsledky analýzy jsou graficky interpretovány na obr. 6.5 a 6.6.

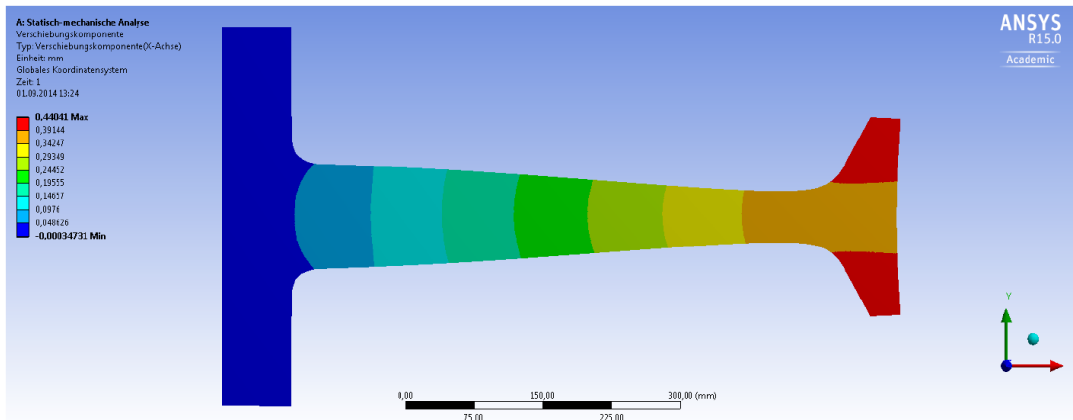
<sup>8</sup> K této hodnotě se dále přičítá moment setrvačnosti rotoru motor–generátoru.

Meshování bylo provedeno pro maximální velikost prvku 1 mm. Zatížení bylo vztaženo k ose symetrie při otáčkách  $3600 \text{ ot. min}^{-1}$ .

Výsledné napětí je znázorněno na obrázku 6.5. Napětí dosáhne maximální hodnoty 316 MPa v místě přechodu disku s unašečem. Dovolené namáhání u oceli 42CrMo4 se pohybuje v rozsahu 500–1000 MPa. Vypočtené napětí tak může být označeno jako podkritické. V případě potřeby lze napětí v místě přechodu unašeče a disku dále snížit optimalizací tvaru zaoblení v místě přechodu.



Obrázek 6.5: ANSYS model – porovnání napětí (von Mises)



Obrázek 6.6: ANSYS model – posunutí

Deformace, které patří k rozloženému napětí z obrázku 6.5, jsou zobrazeny na obrázku 6.6. K maximálnímu posunutí dojde na obrubě a toto činí asi  $440 \mu\text{m}$ . Během operace se mohou očekávat rozšíření poloměru do 1 mm.

Pevnostní analýza v ANSYSu ukázala, že pro navržený setrvačník je možné z hlediska pevnosti uvažovat o fyzické realizaci.

## 6.3 Projektování motor-generátoru setrvačníku

Pro každou technologii ESS je třeba znát její pracovní cyklus, zejména pak špičkový a trvalý poměr nabíjecího a vybíjecího výkonu. Při návrhu motor-generátoru FESS je dobré si uvědomit, že v rámci předepsaného pracovního cyklu totiž nemá žádný princip točivého stroje konstantní účinnost, a tato se dále liší podle toho, jestli pracuje v motorickém, nebo generátorickém režimu.

Hlavním cílem projektování jednotky motor-generátoru, bylo navrhnout takový točivý stroj s měničem, který lze připojit přímo do vlastního trolejového vedení bez nutnosti využít přizpůsobujícího DC-DC měniče.

### 6.3.1 Volba elektrického stroje

Obecně lze využít jakýkoliv princip točivého stroje s měničem. Vzhledem k předpokládanému režimu činnosti motor-generátoru FESS jsou některé principy strojů technologicky nevhodné. Mezi ně se řadí např. všechny typy kartáčových strojů kvůli nárokům na jejich údržbu. Nicméně i některé bezkartáčové principy točivých strojů byly donedávna problematické. Jednalo se především o reluktanční stroje kvůli dlouhodobě, ne zcela uspokojivě, vyřešenému problému momentových pulsací<sup>9</sup>. V konkrétních aplikacích jsou dnes využívány PMSM, SepExSM a ACIM stroje s frekvenčními měniči s vektorovým řízením točivého momentu.

Pro nízkootáčkové setrvačníky se obecně jeví jako nejvýhodnější použití synchronního stroje s cizím buzením s bezkontaktním napájením a řízením rotorového elektromagnetu. Pro provoz setrvačníku je výhodná i přítomnost tlumicího vinutí. Prakticky je rovněž využívána možnost stabilizovat výstupní napětí ve funkci generátoru. Pro vysokovýkonné setrvačníky se běžně používají i asynchronní stroje.

Vliv energetických ztrát v motor-generátoru naprázdno na celkové ztráty setrvačníku je v případě velkých instalací >500 kW marginální. Uvažované ztráty naprázdno zcela odbuzeného stroje, lze pro takto výkonný motor-generátor očekávat do 500 W v případě použití vlastních ložisek a bez ventilátoru. Pokud bude motor-generátor setrvačníku umístěn na společné hřídeli, pak lze ztráty v ložiskách stroje zcela zanedbat, neboť se rozpočítají do ztrát v AMB ložiskách setrvačníku. U PMSM, kde není možné při chodu naprázdno odbudit magnetický obvod rotoru je třeba počítat se ztrátami v řádu jednotek kilowatt (zde velmi záleží na konstrukci celého stroje). Dalším významným zdrojem ztrát je ventilátor stroje v případě, že není využito systému vodního chlazení. U FESS se obvykle požaduje maximální výkon i při nízkých otáčkách, z tohoto důvodu je nezbytné použít externí ventilátor.

Empiricky udávané ztráty pro setrvačnickovou baterii se pohybují mezi 1–3 % nominálního výkonu pro velké instalace. Pro malé instalace se pak udává poměr 25 W kWh<sup>-1</sup> [75]. Např. společnost Piller pro své setrvačnickové baterie Powerbridge o výkonu 1650 kW a využitelné energii 4,5 kWh udává celkové ztráty naprázdno 10 kW, při jmenovitém výkonu pak 50 kW [76].

<sup>9</sup> Momentové pulsace u FESS kladou zvýšené nároky na kvalitu a dynamiku řízení uložení v AMB.

### 6.3.2 Konzultace s výrobcem pohonů

Problematiku výběru vhodného pohonu pro setrvačnick jsem konzultoval s renomovaným výrobcem pohonů, společností Siemens Electric Machines Drásov s.r.o., kterou zastupoval Dr. Ing. Jan Podrapský. Diskutována byla optimální řešení stroje pro základní energetické požadavky vzešlé z vyhodnocení získaných dat.

#### 1) Typ točivého stroje

Standardní katalog Siemens nabízí pro požadovaný výkon a nízké napětí pouze čtyřpólové synchronní stroje včetně tlumicího vinutí, které v režimu odbuzování mohou pracovat do 2250 ot.min<sup>-1</sup>. Pro požadovaný výkon 1000 kW, a zejména rozsah otáček, tak, jako katalogové řešení nabízí Siemens pouze ACIM stroje.

#### 2) Provoz v režimu odbuzování

Katalogové ACIM stroje společnosti Siemens jsou navrženy jako univerzální a lze je provozovat jak při 50 Hz / 3000 ot.min<sup>-1</sup>, tak 60 Hz<sup>10</sup> / 3600 ot.min<sup>-1</sup>. Pro dosažení  $P_n$  udávaného pro 60 Hz je třeba dodat úměrně vyšší napětí, jinak bude stroj pracovat v oblasti konstantního výkonu s  $P_n$  udávaného pro 50 Hz.

#### 3) Napájecí napětí jednotky motor–generátoru s měničem

Tramvajovou síť lze chápat jako DC meziobvod, kde  $U_{min} = 650$  V (maximální zatížení),  $U_n = 740\text{--}760$  V (klidový stav) a  $U_{max} = 835$  V (rekuperace, automaticky omezeno trakční výzbrojí). V případě provozu pohonu s běžným provedením frekvenčního měniče s třífázovým můstkem tento dokáže rozstřídat napětí v DC meziobvodu pomocí SV-PWM modulace na maximálních  $U_s = 0,707$  V DC. Tedy pokud počítáme s napětím v DC meziobvodu mezi 750–830 V, pak vychází maximální dosažitelná efektivní hodnota sdruženého napětí na výstupu měniče na  $U_s = 530\text{--}586$  V AC. Katalogové dvoupólové motory společnosti Siemens od 900 kW výše již vyžadují napájení 690 V  $\Delta$ <sup>11</sup>. Při napájení na výstupu z měniče 530–586 V  $\Delta$  stroj na svých jmenovitých otáčkách nedosáhne svého jmenovitého momentu, a tím pádem ani výkonu. Toto řešení by si tak vyžádalo nutnost použití přizpůsobovacího DC–DC měniče<sup>12</sup>. Nicméně katalog Siemens nabízí i možnost objednat verzi stroje navinutou na 500 V  $\Delta$  / 50 Hz resp. 575 V  $\Delta$  / 60 Hz. Pak musí být v DC meziobvodu 710 V pro  $P_n$  při 50 Hz, resp. 810 V pro  $P_n$  při 60 Hz. Tyto hodnoty vyhovují podmínkám DPMLJ a nabízí se tak možnost provozu FESS bez DC–DC měniče.

#### 4) Výkon stroje při minimálních provozních otáčkách 1800 ot.min<sup>-1</sup>

Z katalogu Siemens lze vyčíst, že dle provedení chlazení, dokáží ACIM stroje udržet plný moment až do  $0,5f_n$ , tedy do 1500 ot.min<sup>-1</sup> při 50 Hz, resp. do 1800 ot.min<sup>-1</sup> pro 60 Hz, což je pro tuto aplikaci dostatečné. Nicméně vzhledem k závislosti výkonu na otáčkách bude pohon s  $P_n = 1$  MW / 50 Hz schopen při 1800 ot.min<sup>-1</sup> poskytnout výkon cca 540 kW a pro požadavek 1 MW bude třeba stroj přetěžovat.

<sup>10</sup> Platí pouze do  $P_n$  stroje 1000 kW.

<sup>11</sup>  $\Delta$  značí zapojení svorkovnice stroje do trojúhelníku, Y do hvězdy.

<sup>12</sup> Společnost Siemens dodává i tyto DC–DC měniče v požadovaných výkonech.

### 5) Provoz stroje v režimu přetěžování

ACIM stroje Siemens lze přetěžovat 150 %  $P_n$  po dobu dvou minut z každé hodiny. Vyšší přetížení, maximálně však do 2  $P_n$ , je možné již jen v řádu desítek sekund během jedné hodiny.

### 6) Možnosti chlazení stroje

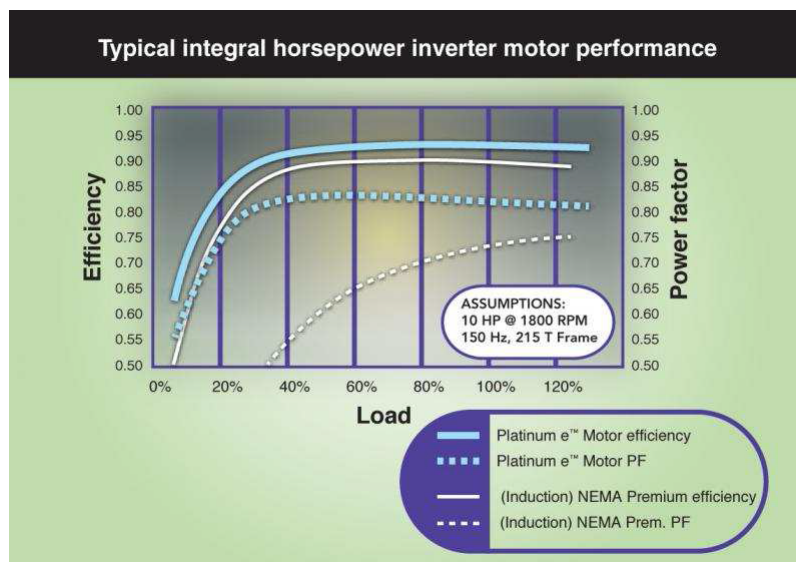
Všechny pohony z katalogu Siemens počítají pouze s chlazením vzduchem, tudíž chlazení statoru vodou lze objednat pouze jako nestandardní úpravu. Pro využití dlouhodobého max. výkonu při nízkých otáčkách ( $>1800 \text{ ot. min}^{-1}$ ) je vyžadováno chlazení externím ventilátorem. Z katalogu lze vyčíst, že pro vzduchové chlazení strojů odpovídající osově výšky FS400–450 pro  $P_n = 1 \text{ MW}$  je doporučeno použít 1,3–3 kW externí ventilátor.

### 7) Ztráty stroje naprázdno (stav, kdy strojem točí setrvačnick)

Stroje ACIM lze zcela odbudít, takže ztráty naprázdno se víceméně omezují zejména na ztráty v ložiskách, resp. ventilátoru. Katalog tuto informaci neuvádí, neboť se jedná o nestandardní režim činnosti. Společnost Siemens je schopna na vyžádání stroj dodatečně upravit pro možnost instalace na společné hřídeli setrvačnicku pro společné uložení v jeho AMB ložiskách.

### 8) Mapa účinnosti jednotky motor–generátoru s měničem

V katalogu běžně udávaná účinnost pohonu pro  $3/4$  a  $4/4 P_n$ , se pro takto výkonné stroje pohybuje v rozmezí 96–97 %. Kompletní mapa účinnosti pro daný stroj ale není k dispozici. Vzhledem k tomu, že pohon bude využíván v režimu provozu S9<sup>13</sup>, lze předpokládat, že u moderního ACIM provozovaného pod 40 %  $P_n$  začne účinnost strmě klesat až k hodnotě 60 % při velmi nízkém zatížení viz obr. 6.7.



Obrázek 6.7: Typický průběh závislosti účinnosti ACIM stroje na zatížení [79]

<sup>13</sup> Kontinuální pohon s neperiodickým zatěžováním a změnami otáček.



Z výše uvedeného rozboru je zřejmé, že na motor–generátor FESS jsou kladeny tak specifické požadavky, že pokud má pracovat s maximální účinností a zároveň pokrýt veškeré výkonové i technologické požadavky, je obvykle jediným řešením vyvinout vlastní točivý stroj, nebo jeho vývoj zadat renomované společnosti. Katalogové pohony pro tuto aplikaci nabízejí příliš mnoho omezení. Přesto je ale možné vycházet z vhodně zvoleného katalogového stroje, zejména pak z jeho momentové charakteristiky. Pro řešenou aplikaci setrvačníku DPMLJ jsou využita data 990 kW katalogového ACIM Siemens (katalog D81.1), výchozí typ: **1LL8407-2PD**.

**Tabulka 6.2:** Katalogové parametry ACIM Siemens 1LL8407-2PD

parametr <sup>a</sup>	hodnota pro dané podmínky	
nom. výkon	900 kW <sub>50 Hz</sub>	990 kW <sub>60 Hz</sub>
max. otáčky	3000 ot. min <sup>-1</sup> <sub>50 Hz</sub>	3600 ot. min <sup>-1</sup> <sub>60 Hz</sub>
nom. účinnost	96,9 % $\eta_{4/4}$	96,8 % $\eta_{3/4}$
nom. moment	2880 Nm	
moment setrvačnosti	11 kg m <sup>2</sup>	
osová výška	FS400	
hmotnost	3200 kg	

<sup>a</sup> při napájení 500 VΔ

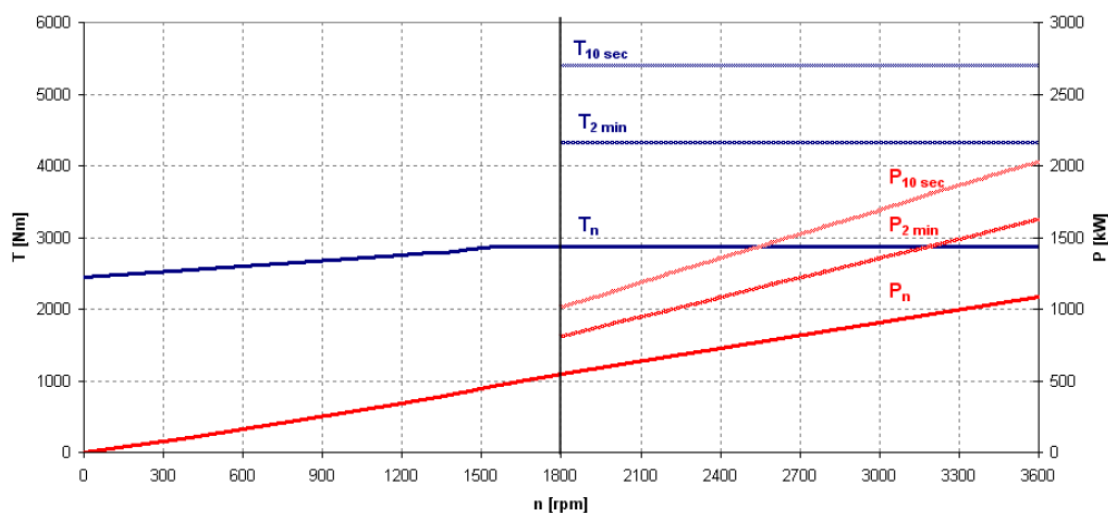
## 6.4 Simulace úložiště na bázi setrvačníku

Cílem zde popsaného principu simulace je vyšetřit průběh energetické bilance FESS a možnost jejího propojení se simulací dané technologie, tedy tramvajového provozu DPMLJ. Vlastní model dynamiky rotujícího disku, jeho vyvážení a dynamické chování AMB ložisek byl řešen kolegy z HS Zittau/Görlitz a získané poznatky jsou uvedeny v závěrečné zprávě projektu [94], a tedy nejsou v této práci diskutovány.

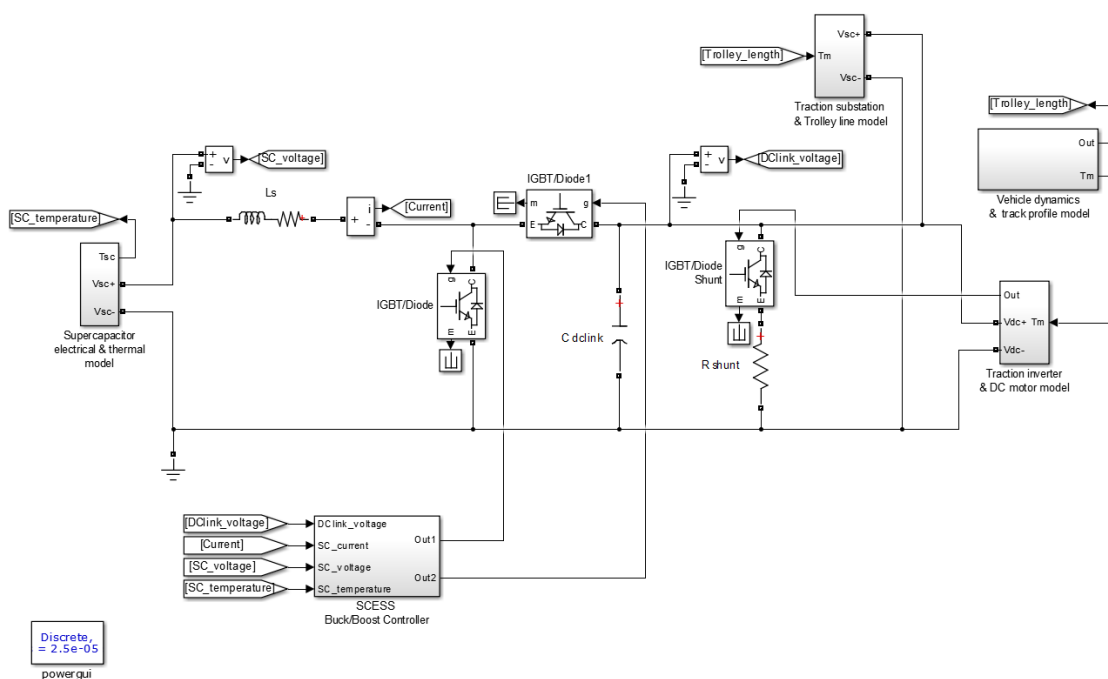
Pro každý princip točivého stroje lze sestavit velmi přesný simulační model. Většina simulačních nástrojů, jako např. MATLAB Simulink, pak v sobě poměrně kvalitní modely točivých strojů přímo obsahuje. Nicméně pokud je hlavním cílem simulace vyšetřit průběh energetické bilance FESS, není jejich přínos pro přesnost simulace signifikantní<sup>14</sup>. Takovýto model také vyžaduje poměrně vysoký výpočetní výkon, a je časově náročné provádět simulace celodenního cyklu. Energetický model chování FESS tak lze nahradit zjednodušeným náhradním modelem kondenzátoru, včetně zjednodušeného teplotního modelu<sup>15</sup> a modelu samovybíjení. Model motor–generátoru je nahrazen ideálním přizpůsobujícím DC–DC měničem, který je řízen dle sestavené tabulky momentové charakteristiky konkrétního typu stroje viz obr. 6.8 a případně tabulky obsahující mapu účinnosti jednotky motor–generátor+měnič.

<sup>14</sup> Standardní modely točivých strojů také obvykle neumí simulovat skutečnou účinnost stroje při libovolném zatížení, což je pro energetickou bilanci FESS podstatný parametr.

<sup>15</sup> U FESS je teplotní model využit pro simulaci krátkodobého přetěžování stroje.



Obrázek 6.8: Momentová charakteristika ACIM Siemens 1LL8407-2PD



Obrázek 6.9: MATLAB Simulink model – implementace modelu energetického úložiště do systému tramvajové trakce. Na obrázku je jako úložiště znázorněn model SCESS, který lze s výhodou využít i pro simulaci FESS. V aktuální verzi simulace není funkční blok Traction substation implementován

## 7 Závěr

V této disertační práci jsou shrnuty současné trendy z oblasti optimálního řízení pohonů a aplikaci moderních energetických úložišť v městské trolejové trakci. Tyto jsou ověřovány v experimentálním elektromobilu a v podobě návrhu stacionární aplikace energetického úložiště na bázi setrvačnicku pro tramvajový provoz v Liberci.

V posledním desetiletí došlo k významné profilaci oblasti technologií energetických úložišť. Nejvýznamnějšího pokroku dosáhla technologie využívající lithiových baterií. Jejich vysoká specifická hustota energie, a především trvale klesající cena za instalaci jedné kWh se velmi rychle vzdaluje ostatním technologiím. Zejména, když technologie superkapacitorů za posledních deset let nedosáhla signifikantního zlepšení parametrů ani snížení enormně vysoké ceny za instalaci jedné kWh úložiště. Naopak moderní nízkootáčková setrvačnicková úložiště energie stále nabízejí optimální vlastnosti pro vybrané stacionární aplikace. Zejména pak pro ty, kde existuje požadavek na kompenzování výkonových špiček odběru z rozvodné sítě v řádu stovek kW až jednotek MW při vysoké robustnosti úložiště.

Mezi hlavní přínosy disertační práce v oblasti elektromobility patří realizace nového prototypu hnacího ústrojí experimentálního elektromobilu TUL. Ústrojí využívá dvou střídavých strojů sdílejících společnou jednorychlostní převodovku. Principem je trvale udržovat pohon v oblasti maximální účinnosti pomocí sdruženého řízení točivého momentu obou strojů.

- Práce obsahuje návrh prototypu jednorychlostní převodovky, výběr vhodných jednotek střídavých elektromotorů a měničů s vektorovým řízením a návrh dedikované řídicí jednotky se stručným popisem činnosti algoritmu řízení.
- Byla provedena měření momentových charakteristik a pasivních odporů jednotek trakčních pohonů v limitech dynamometru VUES ASD 6,3K–4.
- Praktické ověření vlastností realizovaného prototypu hnacího ústrojí se nepodařilo v plném rozsahu kvůli nedodržení plánovaného termínu zprovoznění měřicího zařízení v laboratoři Powertrain 4×4 a laboratoři válcové brzdy TUL. Provedení první série ověřovacích testů je v plánu provést do konce roku 2015.

Dalším přínosem práce v této oblasti je návrh a realizace prototypu trakční baterie, určené pro instalaci do experimentálního elektromobilu.

- Baterie byla navržena s ohledem na optimální využití instalačního prostoru ve voze při maximalizaci vezené energie. Návrh uložení respektuje požadavek na rychlou servisní výměnu celé baterie. Navržená modulární koncepce umožňuje produktivní montáž a servis jednotlivých komponent. Specifická hustota energie baterie je plně srovnatelná s masově produkoványými elektromobily do modelového roku 2015.
- Baterie je dimenzována na pokrytí špičkového mechanického výkonu navrženého prototypu hnacího ústrojí o velikosti 85 kW. K tomuto účelu byl navržen hybridní termální management skládající se z materiálu se změnou fáze – PCM, doplněný o systém roznášecích plechů pro rychlý odvod ztrátového tepla, resp. rychlé natemperování článků baterie pro optimalizaci maximálního výkonu baterie s ohledem na její životnost. Vlastní přívod/odvod tepla z/do bateriové krabice je řešen pomocí tepelného výměníku, využívajícího médium náplně klimatizace.
- Praktické ověření vlastností prototypu trakční baterie při špičkovém zatížení 100 kW / 108 V / 900 A je v podmínkách TUL možné realizovat pouze při zatěžování hnacím ústrojím. Systém nabíjení a elektronický management baterie je funkční.

Nejvíce si cením mezinárodní spolupráce v česko–saském projektu Ziel3. V rámci spolupráce jsem měl možnost podílet se na vypracování podrobné studie: *Vývoj komponent a metod vedoucí ke zlepšení energetické účinnosti trakce z hlediska využití energetického setrvačnicku*. Tento projekt byl úspěšně zakončen a v současné době se připravuje další přeshraniční spolupráce v této oblasti.

## Literatura

- [1] WOOD, Robert A. a Thomas E. SALEM. Evaluation of a 1200-V, 800-A All-SiC Dual Module. In: *IEEE Transactions on Power Electronics*. IEEE, 2011, s. 2504-2511. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2108670. ISSN 0885-8993.
- [2] ALLEN, Scot. CREE, Inc. *Silicon Carbide MOSFETs for High Powered Modules: Product Presentation*. 2013. Dostupné z: <http://www.apec-conf.org/wp-content/uploads/2013/09/is1.1.1.pdf>
- [3] HEJKRLÍK, Jan. *Nízkonapěťový trakční pohon s palivovým článkem*. Brno, 2011. Disertační práce. Vysoké technické učení v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.
- [4] GARCIA, Pablo, Luis M. FERNANDEZ, Carlos Andres GARCIA a Francisco JURADO. Energy Management System of Fuel-Cell-Battery Hybrid Tramway. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010, s. 4013-4023. DOI: 10.1109/TIE.2009.2034173. ISSN 0278-0046.
- [5] MEIYAPPAN SIVA PANDIAN,, Makbul ANWARI, BUDI YANTO HUSODO a Ayong HIENDRO. Efficiency and economics analysis of Proton Exchange Membrane fuel cell. In: *2010 Conference Proceedings IPEC*. IEEE, 2010, s. 875-880. DOI: 10.1109/IPECON.2010.5697089. ISBN 978-1-4244-7399-1.
- [6] AHLUWALIA, R. K. a X. WANG. Argonne National Laboratory. *Fuel Cells Systems Analysis: 2014 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Review*. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2014, 29 s. Dostupné z: [http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress05/vii\\_h\\_7\\_ahluwalia.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress05/vii_h_7_ahluwalia.pdf)
- [7] BUCHMANN, Isidor. BU-210: How does the Fuel Cell Work? Cadex Electronics Inc. *Battery University* [online]. 2015 [cit. 2015-07-02]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/fuel\\_cell\\_technology](http://batteryuniversity.com/learn/article/fuel_cell_technology)
- [8] HASHMI, Syed Mushahid Hussain. *Cooling Strategies for PEM FC Stacks*. Hamburg, 2010. Disertační práce. Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg. Vedoucí práce Professor Dr.-Ing. habil. Stephan Kabelac.

- [9] ZHANG, Guangsheng a Satish G. KANDLIKAR. A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks. In: *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012, s. 2412-2429. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.11.010. ISSN 03603199.
- [10] HYUNDAI MOTOR COMPANY. *ix35 FCEV: Emergency Responce Guide* [online]. 2013, 35 s. [cit. 2015-07-02]. Dostupné z: [http://cafcp.org/sites/files/ix35\\_FCEV\\_ERG\\_Eng.pdf](http://cafcp.org/sites/files/ix35_FCEV_ERG_Eng.pdf)
- [11] KOLÁŘ, Josef. Koncepční řešení mechanické části pohonů dvojkolí. In: *Moderní trakční pohony: sborník semináře Katedry elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě*. [CDROM]. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera, UPCE, 2015. ISBN 978-80-7395-893-0.
- [12] NOVÁK, Jaroslav. Synchronizované řízení pohonu tramvaje s nezávisle otáčivými koly. In: *Moderní trakční pohony: sborník semináře Katedry elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě*. [CDROM]. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera, UPCE, 2015. ISBN 978-80-7395-893-0.
- [13] EHSANI, Mehrdad, Yimin GAO a Ali EMADI. Configurations of EVs in: *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2010, xxii, 534 p. Power electronics and applications series. ISBN 14-200-5398-1.
- [14] FELDEN, Matthias, Patrick BUTTERLING, Peter JECK, Lutz ECKSTEIN a Kay HAMEYER. Electric vehicle drive trains: From the specification sheet to the drive-train concept. In: *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010*. IEEE, 2010, -. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606531. ISBN 978-1-4244-7856-9.
- [15] FINKEN, Thomas, Marco HOMBITZER a Kay HAMEYER. Study and comparison of several permanent-magnet excited rotor types regarding their applicability in electric vehicles. In: *2010 Emobility - Electrical Power Train*. IEEE, 2010, DOI: 10.1109/EMOBILITY.2010.5668074. ISBN 978-1-4244-8410-2.
- [16] BMW AG. *BMW i3 Owner's manual*. Munich, 2014.
- [17] WIDMER, James D., Richard MARTIN a Mohammed KIMIABEIGI. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. In: *Sustainable Materials and Technologies*. 2015, s. 7-13. DOI: 10.1016/j.susmat.2015.02.001.
- [18] ROWLATT, Justin. Rare earths: Neither rare, nor earths. BBC World Service. *BBC* [online]. 2014 [cit. 2015-07-28]. Dostupné z: <http://www.bbc.com/news/magazine-26687605>
- [19] DORRELL, David G., Andrew M. KNIGHT, Mircea POPESCU, Lyndon EVANS a David A. STATON. Comparison of different motor design drives for



- hybrid electric vehicles. In: *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. IEEE, 2010, s. 3352-3359. DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618318. ISBN 978-1-4244-5286-6.
- [20] CHOI, Moonhee, et al. Improvement of the magnetic properties of Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B powders by dysprosium diffusion. In: *Reviews on advanced materials science*. 2011, s. 134-140.
- [21] NAKADA, Tohru, Shigeaki ISHIKAWA a Shunji OKI. Development of an Electric Motor for a Newly Developed Electric Vehicle. In: *SAE Technical Paper 2014-01-1879*. 2014, DOI: 10.4271/2014-01-1879.
- [22] MERWERTH, Joerg, Jens HALBEDEL, Guenter SCHLANGEN, BMW A.G. *Electrical Drive Motor for a Vehicle*. U.S. Patent 20120267977. Dostupné z: <http://www.faqs.org/patents/app/20120267977>
- [23] CHUKWUMA, Junior Ifedi. *A High Torque Density, Direct Drive In-Wheel Motor for Electric Vehicles*. Newcastle, 2013. Disertační práce. Newcastle University, School of Electrical and Electronic Engineering.
- [24] ZHUORAN ZHANG, YANGGUANG YAN, SHANSHUI YANG a ZHOU BO. Principle of Operation and Feature Investigation of a New Topology of Hybrid Excitation Synchronous Machine. In: *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008, s. 2174-2180. DOI: 10.1109/TMAG.2008.2000513. ISSN 0018-9464.
- [25] AMARA, Y., L. VIDO, M. GABSI, E. HOANG, A. HAMID BEN AHMED a M. LECRIVAIN. Hybrid Excitation Synchronous Machines: Energy-Efficient Solution for Vehicles Propulsion. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2009, s. 2137-2149. DOI: 10.1109/TVT.2008.2009306. ISSN 0018-9545.
- [26] MARŠÍKOVÁ, Jarmila. Měděné rotory. *Elektro: časopis pro elektrotechniku* [online]. 2005 [cit. 2015-08-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/medene-rotory--13643>
- [27] LANGHEIM, J. Modeling of Rotor bars with Skin Effect for Dynamic Simulation of Induction Machines. In: *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1989, pp 38-44.
- [28] LYONS, David, Jeffrey B. STRAUBEL, Erik SHAHOIAN a Rudy GARRINGA, Tesla Motors, Inc. *Rotor Design for an Electric Motor*. U.S. Patent 20130069476. Dostupné z: <http://www.faqs.org/patents/app/20130069476>
- [29] BRUSH, Edwin F., John G. COWIE, Dale T. PETERS a Darryl J. VAN SON. Die-Cast Copper Motor Rotors: Motor Test Results, Copper Compared to Aluminum. In: *Energy Efficiency in Motor Driven Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003, s. 136. DOI: 10.1007/978-3-642-55475-9\_21. ISBN 978-3-540-00666-4.

- [30] BRUSH JR., E.F., D.T. PETERS, J.G. COWIE, M. DOPPELBAUER a R. KIMMICH. Recent Advances in Development of the Die-Cast Copper Rotor Motor. In: *Recent Developments of Electrical Drives*. Dordrecht: Netherlands, 2006, s. 349. DOI: 10.1007/978-1-4020-4535-6\_29. ISBN 978-1-4020-4534-9.
- [31] PENG, Zhou, Nicholas R. KALAYJIAN, Grant D. CUTLER a Peteris K. AUGENBERGS, Tesla Motors, Inc. *Liquid Cooled Rotor Assembly*. U.S. Patent 20090121563. Dostupné z: <http://www.faqs.org/patents/app/20090121563>
- [32] SATO, Yoshinori, Shigeaki ISHIKAWA, Takahito OKUBO, Makoto ABE a Katsunori TAMAI. *Development of High Response Motor and Inverter System for the Nissan LEAF Electric Vehicle*. In: . -. DOI: 10.4271/2011-01-0350.
- [33] GM shows 85 kW permanent magnet EV motor. *Gizmag* [online]. 2011 [cit. 2015-08-24]. Dostupné z: <http://www.gizmag.com/gm-85-kw-ev-motor/20329/>
- [34] KANE, Mark. Renault Electric Motor Production at Cléon – Photos and Videos. *Inside EVs* [online]. 2015 [cit. 2015-08-24]. Dostupné z: <http://insideevs.com/renault-electric-motor-production-at-cleon-photos-videos/>
- [35] BIROLLEAU, Damien, Nicholas BRUYERE a Patrick ORVAL, Renault S.A.S. *Device for Guiding a Set of Electrical Wires for Electric Motor Rotor*. U.S. Patent 20140368068. Dostupné z: <http://www.faqs.org/patents/app/20140368068>
- [36] Volkswagen AG. *Volkswagen Service Training, VTT132 e/UP! - The 1-gear gearbox 0CZ in the e-up!*, Wolfsburg, 2013.
- [37] General Motors. *Chevrolet Spark electric vehicle - First responder guide*, GM service technical college. 2014, Dostupné z: <http://www.gmstc.com>
- [38] Volkswagen AG. *Audi R8 e-tron - Drivetrain: Electric Motors - Technical Drawing Wallpaper* [Online], Wolfsburg, 2015. Dostupné z: [http://img.caricos.com/2016\\_audi\\_r8\\_e-tron\\_35.jpg](http://img.caricos.com/2016_audi_r8_e-tron_35.jpg)
- [39] AHMED OMAR, Abdussalam Ali a Başar ÖZKAN. Evaluation of Effect of In-Wheel Electric Motors Mass on the Active Suspension System Performance Using Linear Quadratic Regulator Control Method. In: *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2015, s. 18655-18663. DOI: 10.15680/IJIRSET.2015.0401043. ISSN 23476710.
- [40] Michelin to Commercialize Electric Active Wheel Technology. BioAge Group, LLC. *Green Car Congress: Energy, technologies, issues and politics for sustainable mobility* [online]. 2008 [cit. 2015-07-24]. Dostupné z: <http://www.greencarcongress.com/2008/12/michelin-to-com.html>

- [41] VAN SCHALKWYK, D.J. a M.J. KAMPER. Effect of Hub Motor Mass on Stability and Comfort of Electric Vehicles. In: *2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. IEEE, 2006, s. 1-6. DOI: 10.1109/VPPC.2006.364297. ISBN 1-4244-0158-5.
- [42] ANDERSON, Martyn a Damian HARTY. Unsprung Mass with In-Wheel Motors - Myths and Realities. In: *AVEC 2010: 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control*. Loughborough, 2010, s. 261-266.
- [43] YUTAO LUO, a DI TAN. Study on the Dynamics of the In-Wheel Motor System. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2012, s. 3510-3518. DOI: 10.1109/TVT.2012.2207414. ISSN 0018-9545.
- [44] SCX. VŠB TU OSTRAVA. *StudentCar: Katedra materiálu a technologií pro automobily* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2015-07-23]. Dostupné z: <http://www.studentcar.cz/lang/cs/foto-a-video/scx>
- [45] WATTS, Andy, Andrew VALLANCE, Andrew WHITEHEAD, Chris HILTON a Al FRASER. The Technology and Economics of In-Wheel Motors. In: *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems*. 2010, s. 37-55. DOI: 10.4271/2010-01-2307. ISSN 1946-4622.
- [46] Protean Electric. Image gallery: Technical Art. *Protean Electric* [online]. 2014 [cit. 2015-07-24]. Dostupné z: <http://www.proteanelectric.com/en/image-gallery/technical-art/?img=715&gal=714>
- [47] REN, Q., D.A. CROLLA a A. MORRIS. Effect of transmission design on Electric Vehicle (EV) performance. In: *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. IEEE, 2009, s. 1260-1265. DOI: 10.1109/VPPC.2009.5289707. ISBN 978-1-4244-2600-3.
- [48] KLUGER, Michael A. a Denis M. LONG. An Overview of Current Automatic, Manual and Continuously Variable Transmission Efficiencies and Their Projected Future Improvements. SAE Technical Paper: 1999-01-1259. Detroit, 1999, -. DOI: 10.4271/1999-01-1259.
- [49] BOTTIGLIONE, Francesco, Stefano DE PINTO, Giacomo MANTRIOTA a Aldo SORNIOTTI. Energy Consumption of a Battery Electric Vehicle with Infinitely Variable Transmission. In: *Energies*. 2014, s. 8317-8337. DOI: 10.3390/en7128317. ISSN 1996-1073.
- [50] MIN, Byungsoon, Ronald D. MATTHEWS, Michael DUOBA, Henry NG a Bob LARSEN. Direct Measurement of Powertrain Component Efficiencies for a Light-Duty Vehicle with a CVT Operating Over a Driving Cycle. In: *Advanced Powerplant Concepts 2003 - (SP-1806)*. 2003, -. DOI: 10.4271/2003-01-3202.
- [51] VIOTTO, Fabio. A Novel Seamless 2-Speed Transmission System for Electric Vehicles: Principles and Simulation Results. In: *Electronic Systems for Vehicle Propulsion Symposium*. Troy (Detroit), MI, 8-9 November 2011.

- [52] SORNIOTTI, A., T. HOLDSTOCK, G. L. PILONE, F. VIOTTO, S. BERTOLOTTO, M. EVERITT, R. J. BARNES, B. STUBBS a M. WESTBY. Analysis and simulation of the gearshift methodology for a novel two-speed transmission system for electric powertrains with a central motor. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2012, s. 915-929. DOI: 10.1177/0954407011431415. ISSN 0954-4070.
- [53] HOLDSTOCK, T., A. SORNIOTTI, M. EVERITT, M. FRACCHIA, S. BOLOGNA a S. BERTOLOTTI. Energy consumption analysis of a novel four-speed dual motor drivetrain for electric vehicles. In: *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. IEEE, 2012, s. 295-300. DOI: 10.1109/VPPC.2012.6422721. ISBN 978-1-4673-0954-7.
- [54] TANG, Yifan. Tesla Motors, Inc. *Dual Motor Drive and Control System for an Electric Vehicle*. U.S. Patent 20100222953.  
Dostupné z: <http://www.faqs.org/patents/app/20100222953>
- [55] ADVISOR: Advanced vehicle simulator. NREL. *Transportation Research: Vehicle Technology Simulation and Analysis Tools* [online]. 2004 [cit. 2015-08-08]. Dostupné z: [http://www.nrel.gov/transportation/systems\\_analysis\\_tools.html](http://www.nrel.gov/transportation/systems_analysis_tools.html)
- [56] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. Vyd. 2. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 432 s. ISBN 80-239-0024-2.
- [57] JAZAR, Reza N. *Vehicle dynamics: theory and application*. 1st ed. New York: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-038-7742-441.
- [58] MIROSLAV VALA, Miroslav Tesař. *Teorie a konstrukce silničních vozidel I*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003. ISBN 978-807-1945-031.
- [59] Miles per gallon gasoline equivalent. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-08-30]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Miles\\_per\\_gallon\\_gasoline\\_equivalent](https://en.wikipedia.org/wiki/Miles_per_gallon_gasoline_equivalent)
- [60] BorgWagner Inc. *BorgWagner drivetrain systems eGearDrive*, Auburn Hills, MI, 2011
- [61] DABALA, K. Analysis of mechanical losses in three-phase squirrel-cage induction motors. In: *ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501)*. Int. Acad. Publishers, 2001, s. 39-42. DOI: 10.1109/ICEMS.2001.970604. ISBN 7-5062-5115-9.
- [62] Enstroj, d.o.o. *Owner's manual for the brushless AC synchronous motor EMRAX*. Slovinsko, 2014. Dostupné také z: [http://www.enstroj.si/download.php?f=images/stories/manual\\_for\\_emrax\\_motor\\_december\\_2014\\_new.pdf](http://www.enstroj.si/download.php?f=images/stories/manual_for_emrax_motor_december_2014_new.pdf)

- [63] TIAN, Yanwen, Xiaoxue KANG, Liying LIU, Chaqing XU a Tao QU. Research on cathode material of Li-ion battery by yttrium doping. In: *Journal of Rare Earths*. 2008, s. 279-283. DOI: 10.1016/S1002-0721(08)60081-2. ISSN 10020721.
- [64] Motenergy ME1302 Water-Cooled Brushless. THUNDERSTRUCK MOTORS, LLC. *ThunderStruck Motors* [online]. 2015 [cit. 2015-09-08]. Dostupné z: <http://www.thunderstruck-ev.com/images/thumbnails/0/800/800/ME1302.jpg>
- [65] Curtis 1238-7601 HPEVS AC-20 Brushless AC Motor Kit - 96 Volt. EV WEST. *EV West* [online]. 2015 [cit. 2015-09-08]. Dostupné z: <http://www.evwest.com/catalog/images/thumbs/def/display/products/supply-voltage-150-350-volts-dc-2.jpg>
- [66] Břoušek, Josef. *Převodovka elektromobilu*. Liberec, 2014. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů. Vedoucí práce Ing. Robert Voženílek, Ph.D.
- [67] SAFT SA. *Medium power lithium-ion cells: VL 41 M cells*. Francie, 2006. Dostupné také z: [www.saftbatteries.com](http://www.saftbatteries.com)
- [68] AllCell Technologies, LLC. *PCC Thermal Management Material*. Chicago, USA, 2014. Dostupné také z: [http://www.allcelltech.com/images/datasheets/pcc/AllCell\\_PCC.pdf](http://www.allcelltech.com/images/datasheets/pcc/AllCell_PCC.pdf)
- [69] ŠKODA dopravní technika s.r.o. *Modernizace tramvaje T3*. Plzeň, 2002. Dostupné také z: [http://static.bmhd.cz/data/bmhd-archiv/prospekty/docs/Skoda\\_T3\\_mod-CZ.pdf](http://static.bmhd.cz/data/bmhd-archiv/prospekty/docs/Skoda_T3_mod-CZ.pdf)
- [70] DRÁBEK, Jiří. *Dynamika a energetika elektrické trakce*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1987, 188 s. Dočasná vysokoškolská učebnica (Alfa).
- [71] KUBÍN, Jiří a Aleš RICHTER. The Energy Consumption Measurement of Trams in Liberec City. In: *The 17th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics: The 5th Joint Slovak-Croatian Conference*, 28-30 September. Košice: Slovak Electrotechnical Society, 2011. ISBN 978-8-0553-0734-3.
- [72] PostgreSQL Global Development Group. *PostgreSQL: The world's most advanced open source database* [online]. 2015 [cit. 2015-09-10]. Dostupné z: <http://www.postgresql.org/>
- [73] MAXWELL TECHNOLOGIES INC. *125V Heavy Transportation Module: Datasheet* [online]. 2014 [cit. 2015-08-12]. Dostupné z: [http://www.maxwell.com/images/documents/125vmodule\\_ds\\_1014696-7.pdf](http://www.maxwell.com/images/documents/125vmodule_ds_1014696-7.pdf)
- [74] SANDBERG, Chet. Altair Nanotechnologies, Inc. *IBM Almaden Conference: Lithium Ion Battery - Truth in Advertising* [online]. 2009 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://www.almaden.ibm.com/institute/2009/resources/2009/presentations/ChetSandberg-AlmadenInstitute2009-panel.pdf>

- [75] HARESH, Kamath a Tom KEY. EPRI. *EPRI Energy Storage Handbook: Flywheels*. Knoxville, TN, 2002.
- [76] PILLER Power Systems GmbH. *Uniblock UBT 1300 with 16,5MJ POWERBRIDGE: Technical Datasheet*. Osterode, DE, 2008.
- [77] GOBEY, Julian. PILLER GROUP GMBH. *UPS Technologies, Developments and Applications*. Cardiff, UK, 2014.
- [78] PILLER Power Systems GMBH. *PILLER Powerbridge: The attractive alternative to substations*. Osterode, DE, 2005.
- [79] EITEL, Elizabeth. machine design. *What's the Difference Between AC Induction, Permanent Magnet, and Servomotor Technologies?* [online]. 2012 [cit. 2015-09-14]. Dostupné z: <http://machinedesign.com/motorsdrives/whats-difference-between-ac-induction-permanent-magnet-and-servomotor-technologies>
- [80] PORTNOV, G., et al. *Informes Técnicos Ciemat 1031: Flywheels for Low-Speed Kinetic Energy Storages Systems*. CIEMAT, 2003. ISSN 1135-9420.
- [81] GENTA, Giancarlo. Some considerations on the constant stress disc profile. In: *Meccanica*. 1989, s. 235-248. DOI: 10.1007/BF01556455. ISSN 0025-6455. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF01556455>

## Autorovy publikace

- [82] JANDURA, Pavel. Přehled aktuálně dostupných specializovaných obvodů použitelných pro řízení frekvenčních měničů a střídačů. In: *EPVE .: elektrické pohony a výkonová elektronika : sborník příspěvků z celostátní konference*. [CDROM] Brno: FEL, VUT, 2009. ISBN 978-80-214-3974-0.
- [83] JANDURA, Pavel. *Přehled a vlastnosti současných akumulátorů používaných v elektromobilech* [online]. 2010 [cit. 2015-06-23]. Dostupné z: [http://skfm2010.tul.cz/postery/Jandura\\_Pavel.pdf](http://skfm2010.tul.cz/postery/Jandura_Pavel.pdf)
- [84] JANDURA, Pavel a Martin BUKVIC. Koncept elektromobilu eŠus. In: *XXXIII. celostátní konference o elektrických pohonech*. Plzeň: Česká elektrotechnická společnost ÚOS Elektrické pohony, 2013, s. 40-43. ISBN 978-80-02-02457.
- [85] JANDURA, Pavel a Martin BUKVIC. Lightweight Battery Electric Vehicle for Educational Purposes. In: *Applied Mechanics and Materials*. Switzerland: Trans Tech Publications Inc., 2013, s. 281-285. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.390.281. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMM.390.281>



- [86] JANDURA, Pavel a Jiří KUBÍN. Simulace dynamiky jízdy a spotřeby energie elektromobilu eŠus. In: *Mezinárodní konference učitelů elektrotechniky SEKEL 2013, sborník příspěvků z konference*. Pardubice: Tiskařské středisko a vydavatelství Univerzity Pardubice, 2013, s. 41-46. ISBN 978-80-7395-625-7.
- [87] JANDURA, Pavel. Simulace rekuperace energie tramvaje pro danou trať. In: *VLIII. mezinárodní seminář Katedry elektrotechniky VŠB-TU Ostrava*. Ostrava, 2014, s. 9-11. ISBN 978-80-248-3432-0.
- [88] JANDURA, Pavel a Jiří KUBÍN. Energetická úložiště na bázi setrvačnicku pro městskou tramvajovou trať. In: *IL. mezinárodní seminář Katedry elektrotechniky VŠB-TU Ostrava*. Ostrava, 2015, s. 43-47. ISBN 978-80-248-3757-4.
- [89] JANDURA, Pavel. Moderní úložiště energie pro elektrickou trakci. In: *Moderní trakční pohony: sborník semináře Katedry elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě*. [CDROM]. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera, UPCE, 2015. ISBN 978-80-7395-893-0.
- [90] JANDURA, Pavel. Technická univerzita v Liberci. *Design of Motor-Generator for Flywheel Energy Storage System: project meeting presentation*. Liberec, 2014.
- [91] JANDURA, Pavel, Josef ČERNOHORSKÝ a Aleš RICHTER. Using a Flywheel Energy Storage System For DC City Railway. In: *Automatizácia a riadenie v teórii a praxi : ARTEP 2015*. Košice : TU, 2015, s. 44–1–44–7. ISBN 978-80-553-1968-1.
- [92] JANDURA, Pavel, Josef ČERNOHORSKÝ a Aleš RICHTER. Using a Flywheel Energy Storage System For DC City Railway. In: *Applied Mechanics and Materials*. Switzerland: Trans Tech Publications Inc., 2015, ISSN 1660-9336.
- [93] JANDURA, Pavel, Josef BŘOUŠEK a Martin BUKVIC. The Concept of a Highly Efficient Powertrain for an Electric Vehicle with Respect to Vehicle Driving Dynamics. In: *The 18th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics EDPE 2015: The 7th Joint Slovak-Croatian Conference*. Tatranská Lomnica, 2015. s. 422-429. ISBN 978-1-4673-7376-0.

## Výzkumné zprávy a funkční vzorky

- [94] NEUMANN, Holger, Sebastian REINICKE, Osvald MODRLÁK, Aleš RICHTER, Jiří KUBÍN, Tomáš NÁHLOVSKÝ, Pavel JANDURA, Filip TREŠL, Lukáš HUBKA, et al. *Vývoj komponent a metod vedoucí ke zlepšení energetické účinnosti trakce z hlediska využití energetického setrvačnicku – závěrečná zpráva*. Technická univerzita v Liberci–Hochschule Zittau/Görlitz, 2014, 113 s.

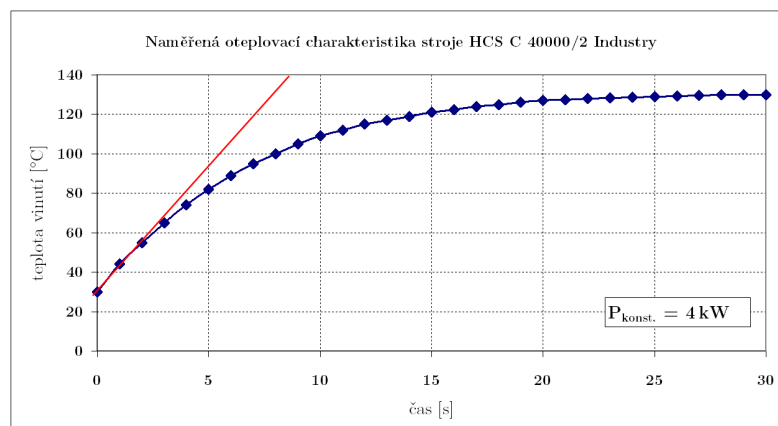
- [95] ČERNOHORSKÝ, Josef, Pavel JANDURA, Jan KOPRNICKÝ a Petr MRÁZEK. *Studie proveditelnosti mobilního robotu v prostorech přádelny – výzkumná zpráva*. Liberec: Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, 2015
- [96] JANDURA, Pavel a Martin BUKVIC. *Elektromobil eŠus : Funkční vzorek*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013
- [97] JANDURA, Pavel a Martin BUKVIC. *Trakční baterie elektromobilu : Funkční vzorek*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015
- [98] JANDURA, Pavel, Josef BŘOUŠEK a Martin BUKVIC. *Hnací ústrojí elektromobilu se dvěma střídavými pohony : Funkční vzorek*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015

## Vedoucí závěrečných prací

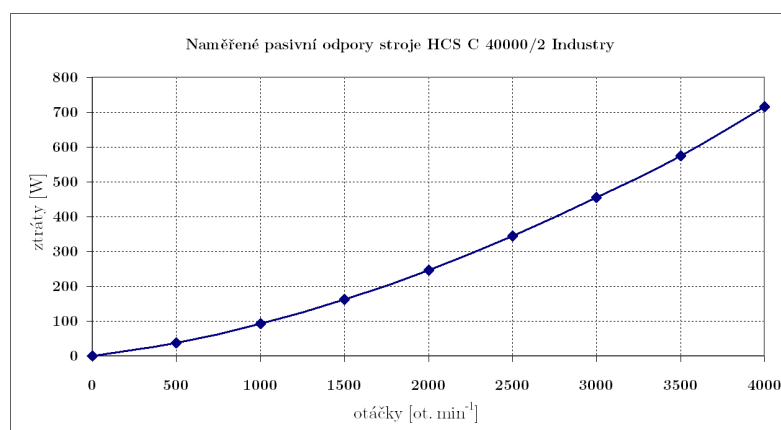
- [99] KOVÁŘ, Jan. *Zobrazovací jednotka pro experimentální elektromobil*. Liberec, 2015. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Ústav mechatroniky a technické informatiky. Vedoucí práce Ing. Pavel Jandura.
- [100] KRČMÁŘ, Lukáš. *Palubní počítač a ostatní elektrická zařízení pro elektrickou koloběžku*. Liberec, 2015. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Ústav mechatroniky a technické informatiky. Vedoucí práce Ing. Pavel Jandura.
- [101] ALBRECHT, Daniel. *Ověření vlastností moderních fotovoltaických článků a stavba FV panelu*. Liberec, 2014. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Ústav mechatroniky a technické informatiky. Vedoucí práce Ing. Pavel Jandura.
- [102] VÍCH, Lubomír. *Napájecí systém palubní sítě elektromobilu*. Liberec, 2014. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Ústav mechatroniky a technické informatiky. Vedoucí práce Ing. Pavel Jandura.
- [103] TOMSA, Jan. *Elektrická zařízení elektromobilu eTUL*. Liberec, 2014. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Ústav mechatroniky a technické informatiky. Vedoucí práce Ing. Pavel Jandura.
- [104] PUNCMAN, Antonín. *Řídicí jednotka elektromobilu*. Liberec, 2013. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Ústav mechatroniky a technické informatiky. Vedoucí práce Ing. Pavel Jandura.

## Přílohy

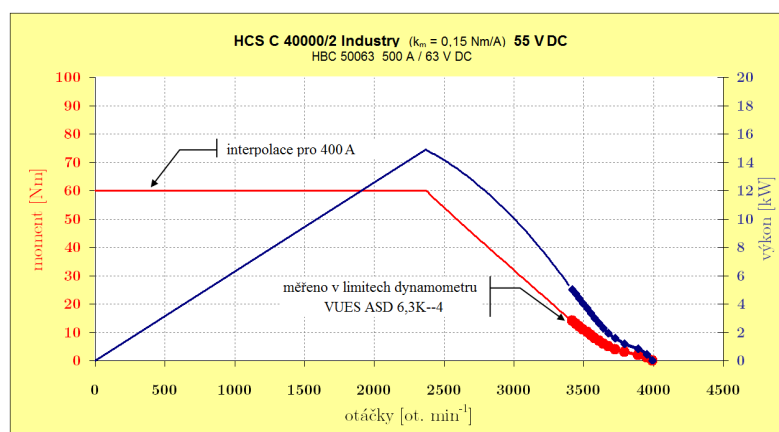
## A Naměřená data elektromotoru HCS C 40000/2 I



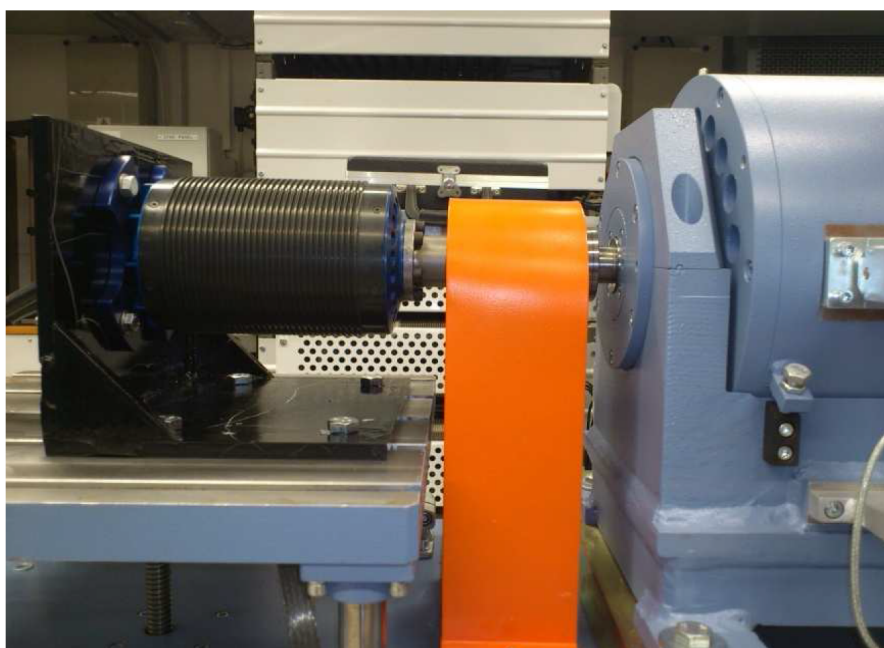
Obrázek A.1: Oteplovací charakteristika stroje HCS C 40000/2 I



Obrázek A.2: Pasivní odpory stroje HCS C 40000/2 I



Obrázek A.3: Momentová charakteristika stroje HCS C 40000/2 I



Obrázek A.4: Detail montáže HCS C 40000/2 Industry k dynamometru VUES



Obrázek A.5: Měřicí pracoviště dynamometru VUES ASD 6,3K-4

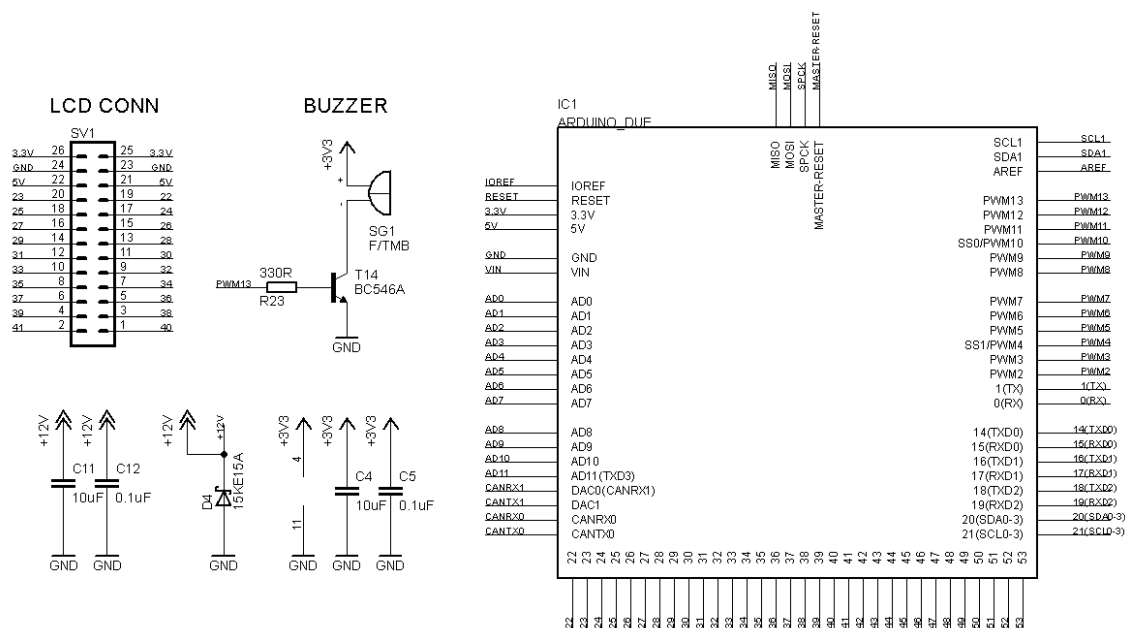




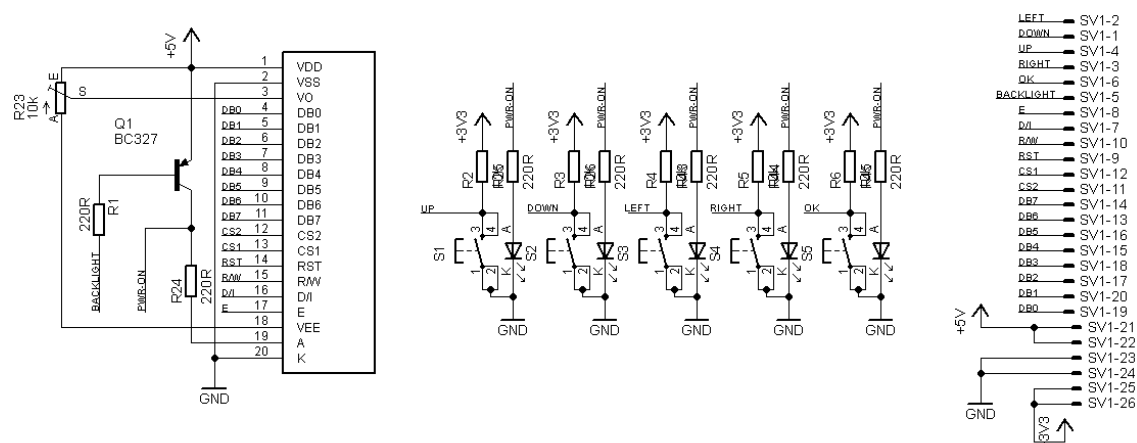
## B.2 Centrální řídicí jednotka elektromobilu

Jednotka byla původně navržena pro spolupráci s měničem HBC 50063 ve voze Gen1 po sběrnici CAN. Z tohoto důvodu byla jednotka VCU koncipována jako centralizovaná. Jejím hlavním úkolem tak bylo především řízení a sledování nabíjecího procesu vozidla. K tomuto účelu byla vybavena rozhraním pro komunikaci s přenosnou nabíječkou POW48V30A, ale i standardizovaným zapojením rozhraní EVSE.

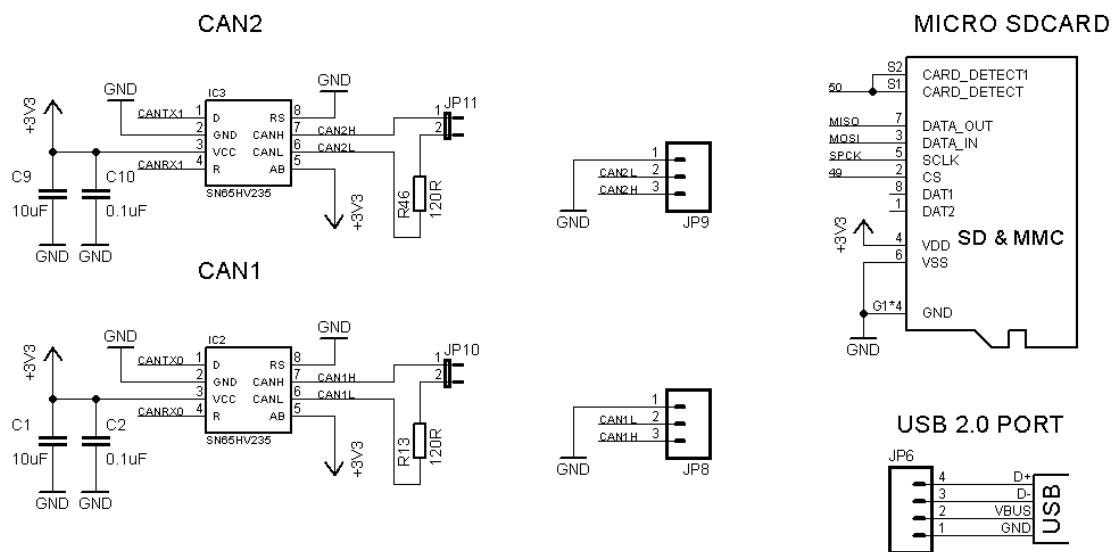
Jádro jednotky tvoří modul Arduino DUE s mikrokontrolérem ARM Cortex M3. VCU je možné osadit deskou s grafickým LCD a podsvícenými ovládacími tlačítky. Pro ukládání vybraných dat slouží čtečka MicroSD karet.



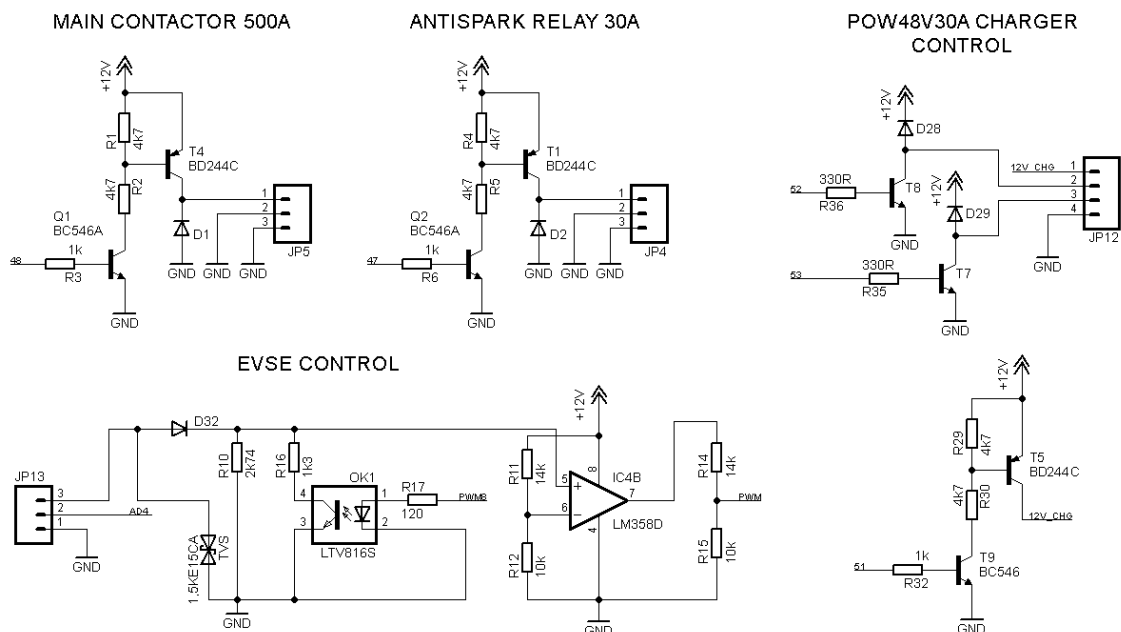
Obrázek B.3: Modul Arduino DUE s řídicím mikrokontrolérem



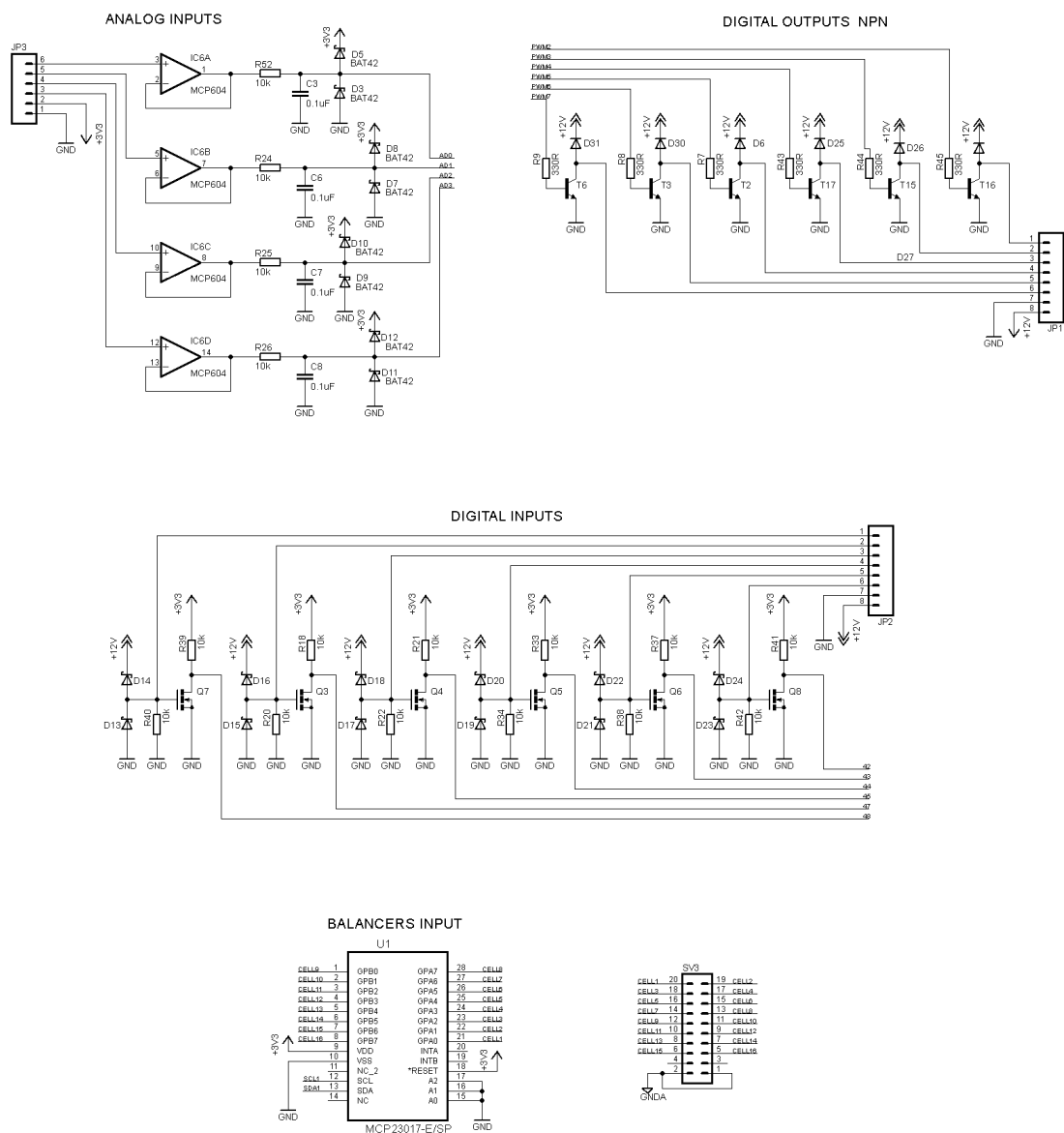
Obrázek B.4: Grafický zobrazovač VCU s podsvícenými tlačítky



Obrázek B.5: Budiče CAN sběrnic, čtečka MicroSD a výstup USB 2.0 z MCU



Obrázek B.6: Ovládání výkonových relé, nabíječe POW48V30A a EVSE



Obrázek B.7: Zapojení vstupů a výstupů jednotky VCU

## C Přehled parametrů technologií lithiových článků

technologie	výrobce	model článku	jmenovité napětí	provozní napětí	jmenovitá kapacita	vnitřní odpor	uložená energie	hmotnost článku	objem článku	volumetrická hustota	hmotnostní hustota	provedení obalu	připojení elektrod
LFP	Winston Batt.	WB-LYP100Ah	3,2 V	2,5 - 3,7 V	100 Ah	?	320 Wh	3500 g	2,42 l	132 Wh/l	91 Wh/kg	plast žebrovaný	závit M8
LFP	CALB	CA100FI	3,2 V	2,5 - 3,7 V	100 Ah	< 0,9 mΩ	320 Wh	3400 g	2,08 l	153 Wh/l	94 Wh/kg	plast	závit M8
LFP	WINA	WN100AH	3,2 V	2,5 - 3,7 V	100 Ah	< 1 mΩ	320 Wh	3350 g	1,81 l	177 Wh/l	95 Wh/kg	Al plochý, fólie	závit M8
LFP	HiPower	HP-LX-100Ah	3,2 V	2,5 - 3,7 V	100 Ah	< 1 mΩ	320 Wh	3170 g	2,12 l	151 Wh/l	101 Wh/kg	plast žebrovaný	závit M8
LFP	Sinopoly	SP-LFP100AHA	3,2 V	2,5 - 3,7 V	100 Ah	< 0,7 mΩ	320 Wh	3150 g	1,91 l	167 Wh/l	101 Wh/kg	plast žebrovaný	závit M8
LFP	GBS Energy	GBS-LFP100AH	3,2 V	2,5 - 3,65 V	101 Ah	< 1 mΩ	320 Wh	2800 g	1,98 l	161 Wh/l	114 Wh/kg	plast žebrovaný	závit
LFP	A123	AMP20M1HD-A	3,3 V	2,5 - 3,7 V	20 Ah	?	65 Wh	496 g	0,26 l	247 Wh/l	131 Wh/kg	Al pytlík, fólie	pásový vývod
LFP	SAFT	VL45E	3,3 V	2,5 - 3,7 V	44 Ah	?	140 Wh	900 g	0,48 l	291 Wh/l	155 Wh/kg	Al válec, fólie	závit
technologie	výrobce	model článku	jmenovité napětí	provozní napětí	jmenovitá kapacita	vnitřní odpor	uložená energie	hmotnost článku	objem článku	volumetrická hustota	gravimetrická hustota	provedení obalu	připojení elektrod
LCO	Samsung	ICR18650-32A	3,75 V	2,7 - 4,35 V	3,2 Ah	?	12 Wh	50 g	17,3 ml	694 Wh/l	240 Wh/kg	Al válec, fólie	svařování
NCA	Panasonic	NCR18650B	3,6 V	2,5 - 4,2 V	3,4 Ah	40 mΩ	12 Wh	47,5 g	17,4 ml	680 Wh/l	250 Wh/kg	Al válec, fólie	svařování
NCA	Panasonic	NCR18650G	3,6 V	2,5 - 4,2 V	3,6 Ah	40 mΩ	12,8 Wh	47,5 g	17,4 ml	725 Wh/l	265 Wh/kg	Al válec, fólie	svařování
NCA	LG chem	INR18650-MJ1	3,63 V	2,5 - 4,2 V	3,5 Ah	?	12,6 Wh	49 g	17,1 ml	735 Wh/l	257 Wh/kg	Al válec, fólie	svařování
NCA	Samsung	INR18650-35E	3,6 V	2,65 - 4,2 V	3,5 Ah	?	12,6 Wh	48 g	17,6 ml	714 Wh/l	262 Wh/kg	Al válec, fólie	svařování
NCA	Saft	VL41M	3,6 V	2,7 - 4,0 V	41 Ah	?	147 Wh	1070 g	0,51 l	285 Wh/l	136 Wh/kg	Al válec, fólie	závit M5
NMC	Keepower	IMR 26650	3,7 V	3,0 - 4,2V	5,2 Ah	?	19,2 Wh	93,6 g	36,5 ml	525 Wh/l	205 Wh/kg	Al válec, fólie	svařování
NMC	Farasis	IMP06160230P25A	3,65 V	2,0 - 4,2 V	25 Ah	< 2 mΩ	91 Wh	485 g	0,22 l	410 Wh/l	185 Wh/kg	Al pytlík, fólie	pásový vývod
NMC	Enax	ENB-LM25	3,7 V	?	25 Ah	< 2 mΩ	92 Wh	565 g	0,3 l	285 Wh/l	152 Wh/kg	Al pytlík, fólie	pásový vývod
NMC	KOKAM	SLPB80460330H	3,7 V	3,0 - 4,2 V	106 Ah	0,55 mΩ	392 Wh	2500 g	1,14 l	343 Wh/l	148 Wh/kg	Al pytlík, fólie	pásový vývod
?	Li-Tec	HEI 40	3,6 V	2,7 - 4,2 V	40 Ah	< 0,7 mΩ	144 Wh	1050 g	0,51 l	287 Wh/l	135 Wh/kg	Al pytlík, fólie	pásový vývod
LMO/LNO	NEC/AESC	?	3,75 V	3,0 - 4,2V	32,5 Ah	?	125 Wh	787 g	0,44 l	317 Wh/l	157 Wh/kg	Al pytlík, fólie	pásový vývod
technologie	výrobce	model článku	jmenovité napětí	provozní napětí	jmenovitá kapacita	vnitřní odpor	uložená energie	hmotnost článku	objem článku	volumetrická hustota	gravimetrická hustota	provedení obalu	připojení elektrod
LMO+LTO	Toshiba	SCiB	2,3 V	1,5 - 2,7 V	20 Ah	0,53 mΩ	46 Wh	510 g	0,26 l	177 Wh/l	90 Wh/kg	Al plochý, fólie	závit
LMO+LTO	Altairano	C035-0023-050	2,3 V	1,5 - 2,9 V	50 Ah	0,4 mΩ	115 Wh	1600 g	0,51 l	116 Wh/l	72 Wh/kg	Al pytlík, fólie	pásový vývod
technologie	výrobce	model článku	jmenovité napětí	provozní napětí	jmenovitá kapacita	vnitřní odpor	uložená energie	hmotnost článku	objem článku	volumetrická hustota	gravimetrická hustota	provedení obalu	připojení elektrod
Li-S	SionPower	?	2,15 V	1,7 - 2,5 V	2,5 Ah	25 mΩ	5,6 Wh	16 g	17,5 ml	320 Wh/l	350 Wh/kg	Al pytlík, fólie	pásový vývod
Li-S	OxisEnergy	?	2,05 V	1,5 - 2,45 V	5 Ah	?	11,5 Wh	51,3 g	43,6 ml	235 Wh/l	200 Wh/kg	Al pytlík, fólie	pásový vývod

Obrázek C.1: Přehled parametrů moderních článků Li-Ion a Li-S

vozidlo BEV	dodavatel článku	technologie článku	objemová hustota čl.	hmotnostní hustota čl.	celková energie	využitelná energie	hmotnost baterie	objem baterie	objemová hustota bat.	hmotnostní hustota bat.	počet článků	zapojení článků	modulů (článků)	teplotní management
<b>Tesla Model S</b>	Panasonic	NCA-C(Si)	680 Wh/l	250 Wh/kg	85 kWh	81 kWh	540 kg	~365 l	~233 Wh/l	155 Wh/kg	7104	74p96s	16 (6x74cell)	kapalina
<b>Audi R8 e-tron</b>	?	NCA-C(Si)	?	?	90,2 kWh	?	595 kg	?	?	154 Wh/kg	7488	104s72p	52 (2x72cell)	kapalina
<b>Tesla Roadster</b>	Panasonic	LCO-C	453 Wh/l	176 Wh/kg	53 kWh	?	450 kg	?	?	118 Wh/kg	6831	69p99s	11 (9x69cell)	kapalina
<b>BMW i3</b>	Samsung-SDI	NMC-C	?	?	22 kWh	18,8 kWh	233 kg	191 l	115 Wh/l	95 Wh/kg	96	96s	8 (12cell)	kapalina
<b>Nissan Leaf</b>	AESC	LMO(LNO)-C	317 Wh/l	157 Wh/kg	24 kWh	21,3 kWh	294 kg	?	?	81 Wh/kg	192	2p96s	48 (4cell)	pasivní
<b>VW e-UP!</b>	VW	NMC-C	305 Wh/l	158 Wh/kg	18,7 kWh	18,7 kWh	230 kg	211 l	89 Wh/l	89 Wh/kg	204	2p102s	17 (12cell)	pasivní
<b>VW e-Golf 2015</b>	Sanyo	NMC-C	305 Wh/l	158 Wh/kg	24 kWh	24 kWh	312 kg	229 l	106 Wh/l	76 Wh/kg	264	3p88s	27 (6/12cell)	pasivní
<b>Kia Soul EV</b>	SK innovation	NMC-C	?	200 Wh/kg	30,5 kWh	27 kWh	275 kg	241 l	127 Wh/l	111 Wh/kg	192	2p96s	8 (20/28cell)	vzduch
<b>Renault Zoe</b>	LG Chem.	NMC-C	275 Wh/l	157 Wh/kg	25,9 kWh	23,3 kWh	290 kg	?	?	89 Wh/kg	1870	2p96s	12 (16cell)	
<b>Chevrolet Spark EV<sup>1)</sup></b>	LG Chem.	NMC-C	?	?	20,8 kWh	18,4 kWh	215 kg	237 l	88 Wh/l	88 Wh/kg	192	2p96s	6 (32cell)	kapalina
<b>Chevrolet Spark EV<sup>2)</sup></b>	A123	LFP-C	247 Wh/l	131 Wh/kg	21,4 kWh	18,6 kWh	254 kg	237 l	90 Wh/l	84 Wh/kg	21 400	3p112s	4 (84cell)	kapalina
<b>Škoda Octavia e-line<sup>3)</sup></b>	JSC-SAFT	NCA-C	285 Wh/l	136 Wh/kg	26 kWh	?	315 kg	?	?	82 Wh/kg	180	2p90s	30 (6cell)	vzduch
<b>TUL eŠus Gen1</b>	Winston batt.	LFP-C	126 Wh/l	83 Wh/kg	10,8 kWh	10,8 kWh	150 kg	132 l	82 Wh/l	72 Wh/kg	17	17s	2 (8/9cell)	pasivní
<b>TUL eŠus Gen2</b>	JSC-SAFT	NCA-C	285 Wh/l	136 Wh/kg	18,8 kWh	18,8 kWh	220 kg	162 l	116 Wh/l	84 Wh/kg	132	33s4p	10/11 (12cell)	hybridní

<sup>1)</sup> změna od MY2015

<sup>2)</sup> do MY2014

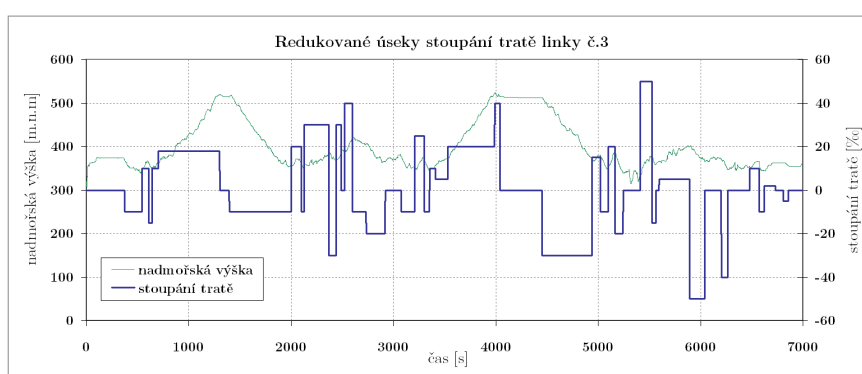
<sup>3)</sup> sdílí platformu s VW e-Golf VII. generace, stejné články využívá i elektromobil TUL Gen2

Obrázek C.2: Přehled parametrů trakčních baterií moderních BEV

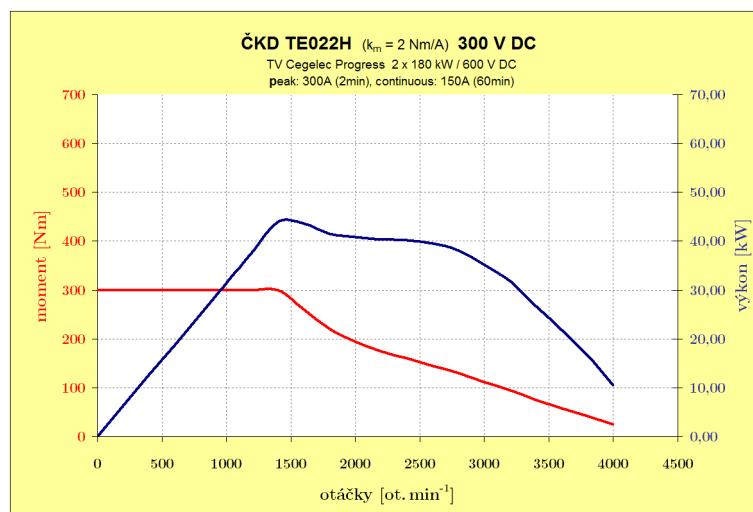
## D Podklady pro simulaci tramvajového vozu T3R.PLF

Tabulka D.1: Parametry hnacího ústrojí vozu T3R.PLF

parametr	značka	hodnota
poloměr kola	$r_d$	325 mm
převodový poměr	$i_c$	7,43
účinnost převodů	$\eta_c$	0,9
kola+hřídel	$J_k$	27,65 kg m <sup>2</sup>
kardan+převod	$J_p$	0,0845 kg m <sup>2</sup>
motor	$J_m$	0,46 kg m <sup>2</sup>



Obrázek D.1: Redukovaný profil stoupání tratě linky č.3



Obrázek D.2: Momentová charakteristika ČKD TE022H s TV Cegelec Progress. Data jsou převzata z katalogového listu stroje a upravena dle katalogových parametrů trakční výzbroje Progress

## E Balance měsíční spotřeby provozu DPMLJ

